

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

1 (162) 2026

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –
Випуск 1 (162). - Дніпро, 2026. – 303 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології обробки
інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 28.01.2026 р., № 6

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Науки, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2026

І.О. Калініна, О.П. Гожий, С.І. Шиян, В.О. Гожий, Л.Ю. Пастернак
**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Анотація. У статті розглядається інтелектуальна система прогнозування для моніторингу об'ємів палива на судні. Система вирішує такі завдання моніторингу: аналіз та оцінка даних, побудова моделей та прогнозування значень для прийняття рішень. Інформаційна система складається з таких підсистем: підсистема збору та зберігання інформації, підсистема підготовки даних, підсистема аналізу та попередньої обробки даних, підсистема моделювання та підсистема прогнозування. У підсистемі прогнозування передбачено модуль комбінування прогнозних значень, який реалізує сім різних методів комбінування прогнозних значень. У більшості випадків комбінування допомагає покращити якість прогнозів. В експериментальній частині дослідження розглядається проблема прогнозування обсягів можливого заповнення систем зберігання паливом на основі звіту про регулярний збір даних про рівень та кількість палива в резервуарах на судні. Для прогнозування використовувалися такі методи машинного навчання: моделі ARIMA/SARIMA, експоненціальне згладжування, регресійні нейромережіві моделі та BSTS-моделі. Оцінка якості отриманих прогнозних значень проводилася за допомогою наступних метрик якості: MAE, MSE, RMSE. Інформаційна система дозволяє отримувати високоякісні прогнози кількості палива для резервуарів різних типів, а також узагальнені показники.

Ключові слова: Інтелектуальна система прогнозування, методи машинного навчання, моніторинг палива, комбінування прогнозних значень.

Вступ. Розвиток сучасних технологій керування складними технічними об'єктами та системами дали розвиток спеціалізованим методам спостереження, методам аналізу, які постійно збирають, обробляють та оцінюють інформацію, дані про стан об'єкта і системи в цілому. Цей процес носить назву моніторингу.

Моніторинг – це система постійної оцінки та прогнозу змін стану будь-якого технічного, природного, соціального та об'єктів інших галузей на основі постійних спостережень. В рамках системи спостережень відбувається контроль за об'єктом, оцінювання стану об'єкта та управління об'єктом в залежності від впливу певних факторів. Моніторинг формально визначають, як систематичний процес збору і аналізу інформації про певний об'єкт, явище або процес з метою відстеження змін, контролю та прийняття обґрунтованих рішень на основі зібраної інформації.

Моніторинг паливної системи – це процес відстеження та управління рівнем і витратою палива з використанням технологій для підвищення ефективності експлуатації, зменшення шкідливих викидів та відходів, запобігання зловживанням та протиправним діям. Моніторинг може відбуватися в реальному часі або періодично, дозволяючи оцінювати динаміку змін та певні тенденції. Сучасні системи моніторингу паливної системи будуються на основі вбудованих систем, які використовують датчики та загальну шину (наприклад: CAN) для передачі даних, або за допомогою зовнішніх систем управління паливом, які поєднують GPS-відстеження з датчиками рівня палива, витратами та програмним забезпеченням [1,2]. У ширшому сенсі це також включає бортові моніторингові системи, які перевіряють співвідношення повітря-паливо та виявляють несправності в системах зберігання палива та паливно-мастильних систем двигунів.

Але існуючі методи моніторингу палива мають певні обмеження. Багато традиційних підходів базуються на статичних нормативах, розрахованих на основі усереднених умов, що робить їх малоефективними для точної оцінки ефективності в реальних, динамічно змінюваних умовах експлуатації. Навіть сучасні телеметричні системи, що збирають великі обсяги даних, здебільшого виконують функцію реєстрації та базової звітності, але не надають інструментів для глибокого аналізу причин витрат. Це підвищує ризик фінансових втрат через технічні несправності, неефективну експлуатацію або несанкціоновані дії.

Постановка проблеми. Мета даної роботи полягає в дослідженні методів прогнозування засобами машинного навчання при вирішенні задачі моніторингу на прикладі суднової паливної системи. Підвищення ефективності використання палива за рахунок розробки інформаційної системи прогнозування для вирішення завдань моніторингу на основі методів машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз літературних джерел, які висвітлюють проблеми моніторингу паливних систем показує, що головною тенденцією в створенні сучасних систем моніторингу є використання інноваційних технологічних рішень в апаратному забезпеченні та технологій машинного навчання в процесі обробки даних з метою підвищення точності моніторингу та підвищення ефективності прийняття рішень при керуванні паливною системою. Управління моніторингом палива є критичними технологіями, де системи моніторингу рівня палива є ключовими, тому промисловість все більше шукає автоматизовані та дистанційні рішення для здійснення контролю і керування систем зберігання палива.

Актуальними технологіями моніторингу є бездротові системи моніторингу палива. В роботі [3] розглянуто проект системи моніторингу, в якій для максимально ефективного використання дизельного палива та спрощення своєчасного заправлення у віддалених місцях, використовується протокол WebSocket для підключення датчиків палива та мобільного додатку у режимі реального часу. Завдяки використанню мереж Wi-Fi клієнти можуть отримувати інформацію про споживання, контролювати поточ-

ний рівень дизельного палива в різних баках та керувати їм за допомогою мобільного додатку.

У роботі [4] досліджується проектування та впровадження високоточної системи моніторингу на основі ємнісних датчиків. Проект спрямований на усунення недоліків традиційних методів та встановлення нового стандарту ефективного та надійного управління паливом шляхом ретельного вибору датчиків, розробки складних електронних схем для точного вимірювання, впровадження складного програмного забезпечення для обробки сигналів та перетворення рівня, а також створення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача для візуалізації даних у режимі реального часу.

В дослідженні [5] було запропоновано проект, який використовував інтелектуальні пристрої для автоматизації вимірювання рівня палива, для більш точного контролю та гарантувати точну подачу бензину на заправках. У системі використовуються GSM-модулі та інтелектуальні датчики палива. Система має систему сигналізації, яка спрацьовує, коли рівень бензину аномально змінюється, можливо, свідчаючи про зловживання або аномалії у мережі споживання палива.

В роботі [6] запропоновано систему моніторингу рівня палива, яка поєднує конфігурацію GSM-модуля Arlicom 12 з розробленим датчиком. Це дозволяє передавати керуючі сигнали з мобільного пристрою для дистанційного моніторингу палива. В роботі [7] описано проект, який пропонує використовувати технологію IoT для вирішення проблеми моніторингу палива. Детально представлено апаратні особливості реалізації проекту. Проект реалізовано на платформі Arduino.

Ефективний моніторинг використання палива дозволяє скоротити загальні викиди шкідливих газів в атмосферу щонайменше на 20%. Тому особливо важливі дослідження, спрямовані на скорочення викидів від експлуатації суден через впровадження інноваційних кроків, а також через високі ціни на паливо. Споживання палива суден контролюється щоденними полуденними звітами під час рейсу, а також через компанії, які виконують цю послугу від імені судноплавних агентств. з цих причин. Тому морська галузь зосереджена на ефективності використання палива за допомогою таких методів, як рекуперация відпрацьованого тепла, оптимізація завантаження, технічне обслуговування та ефективне проектування корпусу судна [8,9]. На додаток до всіх цих методів, використовується прогнозування споживання палива в рамках заходів з моніторингу, також важливе для оптимізації умов експлуатації судна.

Оперативне оцінювання споживання палива на суднах ускладнюється через мінливі експлуатаційні та екологічні умови, а також роботу силових та приводних систем представлено в роботі [10]. За останнє десятиліття для прогнозування енергоефективності суден були запропоновані різні методи економії палива. В одному з цих методів були досліджені фактичні дані зі звітів, пов'язані зі споживанням палива, та зроблена спроба прогнозувати споживання. Також була проведена оцінка споживання палива на основі прогнозів погоди для маршруту плавання суден за допомогою Автоматичної системи ідентифікації (AIS) [11]. Незважаючи на те, що існує багато досліджень на цю тему, зазвичай внутрішні та зовнішні фактори, такі як умови навколишнього середовища, вітер, хвилі, течії, оберти головного двигуна, швидкість судна тощо, нехтують.

Використання методів машинного навчання дозволяє значно підвищити ефективність. Так метод множинної лінійної регресії може бути використаний для знаходження зв'язку між кількома змінними, згаданими вище. Цей метод довів свою успішність завдяки використанню в різних програмах прогнозування. Наприклад, множинні лінійні регресії можна використовувати для знаходження зв'язку між змінними та, особливо, для оцінки споживання енергії [12].

Розробка інформаційно-аналітичної системи прогнозування ПММ. Структура системи прогнозування (рис. 1) представлена на рівні підсистем. Інформація по спостереженню за параметрами паливно-мастильних матеріалів (ПММ) зберігається в підсистемі збору і зберігання інформації. З цієї підсистеми починається процес моніторингу, якій об'єднує функції спостереження, аналізу, прогнозування, оцінки та розробки рекомендацій для прийняття рішень. Підсистема підготовки даних сформована з двох модулів: модуль формування набору даних зі збереженої інформації та модулю формування і генерації часових рядів. Підготовлений набір даних передається в підсистему аналізу та попередньої обробки даних. У складі цієї підсистеми чотири модулі: модуль виявлення і обробки пропусків в даних, модуль аналізу автокореляції, модуль ідентифікації нелінійності та її типів, модуль ідентифікації нестационарності та її типів. Підготовлені дані далі використовуються в підсистемі моделювання [13-15].

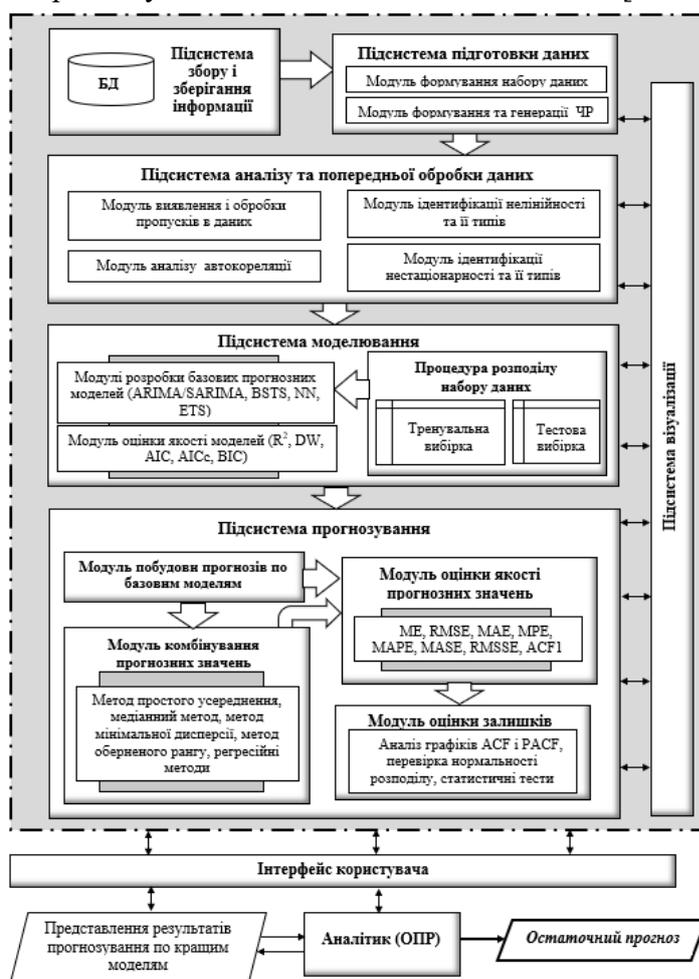


Рисунок 1 – Структура інтелектуальної системи прогнозування ПММ

Процес моделювання починає процедура розподілу набору даних на дві вибірки: тренувальну і тестову. Ці вибірки використовуються в модулях розробки базових прогнозних моделей і в модулі оцінки якості цих моделей. Кращі прогнозні моделі використовуються підсистемою прогнозування. Спочатку формуються прогнози на основі базових моделей. Далі за допомогою модуля оцінки якості прогнозних значень прогнози оцінюються для вибору кращих. Але модуль комбінування прогнозних значень дозволяє за допомогою семи методів комбінування на основі прогнозних значень по базовим моделям отримати покращення прогнозів. Модуль оцінки якості прогнозних значень дозволяє підтвердити покращення прогнозів після комбінування. За допомогою модуля оцінки залишків виконується діагностика залишків по обраним для прогнозування моделям.

В результаті роботи інформаційної системи аналітику надаються результати прогнозування по кращим моделям для вибору остаточного прогнозу для обраного значення горизонту.

Експериментальна частина. Першим етапом прогнозування є процес підготовки даних. Джерелом даних в експериментальній частині роботи були реальні судові журнали, які формовані на основі звітності про надання паливно-мастильних матеріалів сервісними компаніям. Приклад одного з таких звітів представлено на рис. 2. Звіти регулярного збору даних про рівень та кількість палива в танках надають щоденну інформацію про рівень заповнення п'яти видів танків з дизельним паливом і чотирьох видів танків з мазутом. По кожному танку надається максимальна величина заповнення паливом, яка дорівнює 85% місткості танка. Сукупність звітів відповідає періоду спостережень з 01.07.2024 до 01.11.2024.

		DATE: 01.07.2024		TIME:		08:00:00			
Draft:		For'd	6,65	Aft	7,95	Trim	1,30		
MARINE FUEL OIL									
TANK №	Sounding cm	Gross Observed Volume CU.M	DENSITY at 15 C (vac)	Observed TEMP °C	TABLE 54B VCF	Gross Standard Volume CU.M	TABLE 56 WCF	WEIGHT MT (in air)	85% Tank Capacity in cu.m
	1	2	3	4	5	6=2x5	7	8=3x6x7	(will not be printed)
Heavy fuel oil tank №7 HFOT P/S	540	67,44	0,9682	29	0,9900	66,766	0,99885	64,57	120
Heavy fuel oil tank №9 HFOT Stbd/S	624	93,63	0,9682	29	0,9900	92,694	0,99885	89,64	129
Settling tank №5 HFOT P/S	197	11,07	0,9682	70	0,9605	10,633	0,99885	10,28	11,33
Service tank №6 HFOT P/S	52	3,74	0,9682	80	0,9532	3,565	0,99885	3,45	14,69
TOTAL: IFO		175,88						167,94	275,02
▶ 01.07.2024		02.07.2024	03.07.2024	04.07.2024	05.07.2024	06.07.2024			

Рисунок 2 – Фрагмент звіту регулярного збору даних про рівень та кількість палива в танках на 01.07.2024

Для реалізації підсистеми підготовки даних інформаційної системи прогнозування розроблена блок-схема, яка наведена на рисунку 3. Згідно структури інформаційної системи в блок-схемі представлено два модуля: модуль формування набору даних та модуль формування та генерації часових рядів. Для формування початкового набору даних дані по заповненню танків перераховані в щоденні дані кількості пального для дозаправки і зведені в *.xlsx файл.

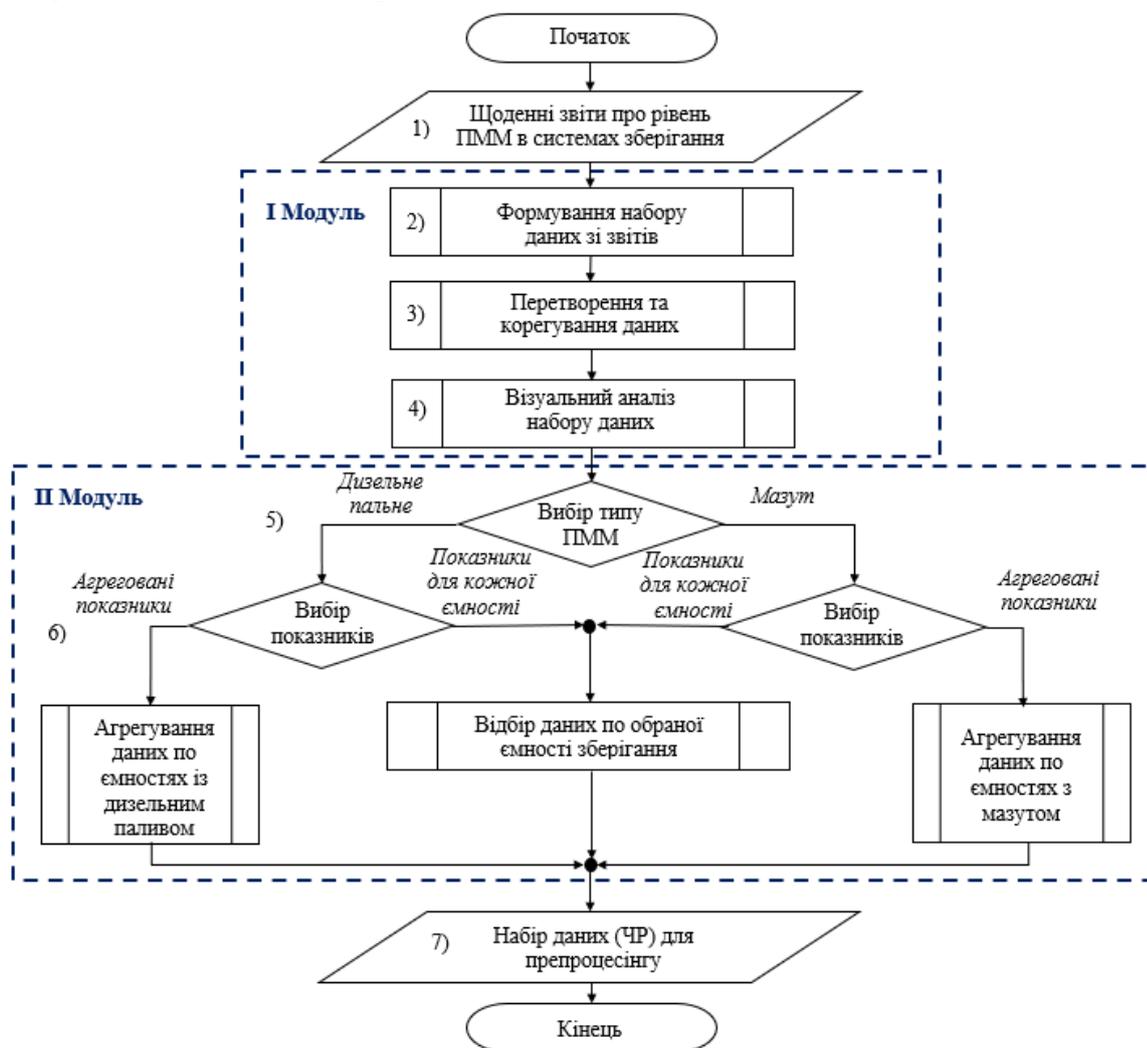


Рисунок 3 – Блок-схема підсистеми підготовки даних

Відповідно до алгоритму (рис. 3) інформаційна система дозволяє будувати моделі та прогнозувати обсяги можливого наповнення паливом для будь-якого танка, а також прогнозувати сумарні показники по танках, які відповідають одному типу палива (дизельного палива чи мазуту). Роботу підсистеми аналізу та попередньої обробки даних представлено на прикладі підготовки даних місткість танку з дизельним паливом для заправки. В результаті перевірки пропущених значень в наборі даних *diesel_oil_tank_1* не виявлено.

STL-розкладання показує, що загальний тренд демонструє поступове спадання, а також компонента тренду сумісно з випадковими факторами формує загальну диспер-

сію даних. Сезонність помітно варіює у часі, що повторюється кожен тиждень, але дисперсія значень сезонності доволі низька. Аналіз автокореляції даних виявив помірний зв'язок між значеннями часового ряду на всіх дев'яти зсувах. Ступінь зв'язку між часовим рядом та його зсунутими копіями кількісно проаналізовано за допомогою графіків ACF та PACF. Значення ACF поступово зменшуються зі збільшенням лагу, але затухання відбувається повільно. Це свідчить про наявність тренду в часовому ряді. Статистичні тести Дарбіна-Уотсона та Бройша-Готфрі на наявність автокореляції підтвердили її існування.

Додатково до візуального аналізу статистичні тести підтвердили наявність нелінійності процесу, якій досліджувався. Тести Дікі-Фуллера, KPSS та тест Філіпса-Перрона на одиничний корінь підтвердили наявність нестационарності.

Підготовлений для моделювання набір даних було поділено у співвідношенні 80:20. Таким чином, 99 спостережень було виділено як навчальну вибірку, яка підготовлена для навчання моделей та аналізу їх адекватності. А 25 спостережень було залишено як тестову вибірку, призначену для перевірки якості базових прогнозних моделей. Такий підхід дозволяє уникнути перенавчання, коли модель показує високі результати на навчальних даних, але погано працює на нових, невідомих даних.

Як основні прогнозні моделі були розглянуті моделі ARIMA/SARIMA, моделі експоненційного згладжування, регресійні нейромережеві моделі та BSTS моделі. Для кожної моделі було підібрано структуру та знайдено параметри, при яких моделі мали найкращі показники якості передбачень на тестовому наборі даних. Графічне подання результатів моделювання та прогнозування з використанням базових прогнозних моделей представлено на рисунку 4. Для кожної моделі графіки демонструють прогнозування лише тестової частини часового ряду. У таблиці 1 подано значення метрик якості прогнозів після навчання та тестування кожної з базових прогнозних моделей.

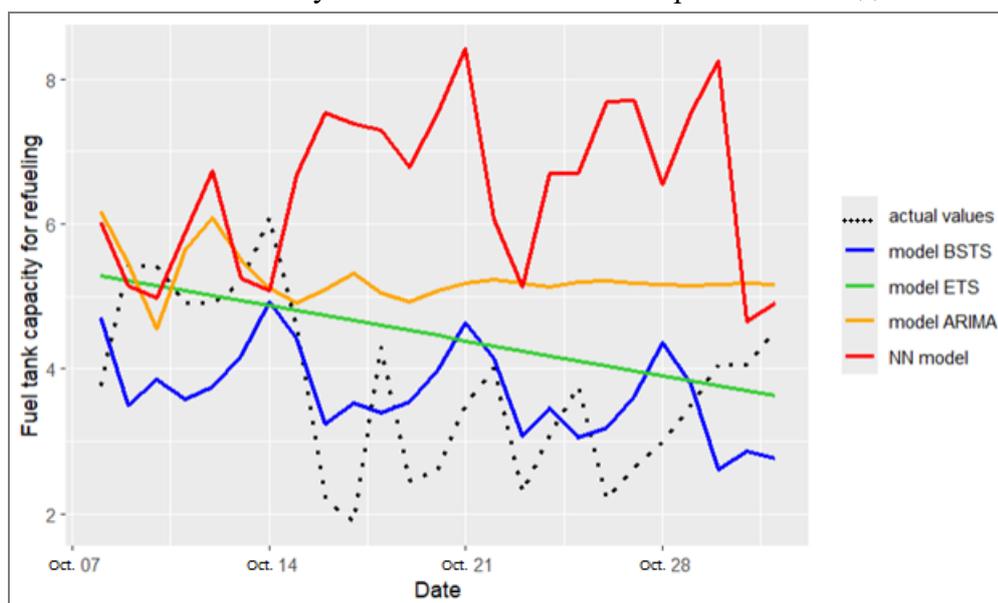


Рисунок 4 – Графіки фактичних обсягів можливої заправки дизельним паливом для танка № 1 на тестовій вибірці та прогнози з використанням найкращих моделей прогнозування

Таблиця 1

Таблиця оцінок якості прогнозу для тестової вибірки на основі найкращих моделей

№	Типи моделей	Метрики якості прогнозів		
		MSE	RMSE	MAE
1	Модель BSTS (локальний рівень + тренд + тижнева сезонність)	1,3343	1,1551	1,0594
2	Модель експоненційного згладжування (модель Хольта)	1,5666	1,2517	0,9637
3	ARIMA (0,1,4)(1,0,0)[7]	3,5024	1,8715	1,6171
4	NNAR (25,25,k)[7], Max_it=1500	11,4945	3,3904	2,8733

Найкращі показники по метрикам якості отримано по BSTS моделі, це продемонстровано і на рис. 4 і по таблиці 1. Але в зв'язку зі складністю процесу, якій досліджувався, була потреба скористатись підходами по покращенню якості прогнозів. Тому були використані 7 методів комбінування прогнозних значень: метод простого усереднення, медіанний метод, метод мінімальної дисперсії, метод оберненого рангу, метод побудови регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменших квадратів, метод побудови регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменшого абсолютного відхилення і метод комбінування кількох регресійних моделей. У таблиці 2 представлено значення метрик якості прогнозів після комбінування прогнозних значень базових прогнозних моделей.

Таблиця 2

Оцінки точності прогнозу шляхом комбінації прогнозних значень для найкращих базових моделей

№	Типи моделей комбінування прогнозних значень	Метрики якості прогнозів		
		MSE	RMSE	MAE
1	Модель простого усереднення	4,4347	2,1059	1,7710
2	Медіанна модель	3,3955	1,8427	1,5612
3	Модель методу мінімальної дисперсії	2,4205	1,5558	1,2558
4	Модель методу зворотного рангу	0,8535	0,9238	0,6858
5	Регресійна модель з коефіцієнтами, підібраними методом найменших квадратів	3,0357	1,7423	1,4338
6	Регресійна модель з коефіцієнтами, вибраними методом найменшого абсолютного відхилення	0,7938	0,8910	0,7434
7	Модель, що базується на комбінації кількох регресійних моделей	0,8250	0,9083	0,7858

В результаті порівняння метрик якості прогнозів з таблиць 1 і 2 можна побачити, що три з семи методів комбінування демонструють покращення якості прогнозів в порівнянні з результатами по BSTS моделі. Це результати використання методу оберненого рангу, методу на основі регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменшого абсолютного відхилення і методу комбінування кількох регресійних моделей.

Графік залишків та діагностичне тестування на основі моделі комбінування прогнозів додатково підтверджують якість моделі тому, що модель перевірена на наявність автокореляції в залишках за допомогою тесту Бокса-Люнга, та гетероскедастичності. Нормальність розподілу залишків підтверджено за допомогою тесту Шапіро-Вілکا.

За допомогою описаних процедур здійснюється прогнозування об'ємів можливого наповнення інших танків суднової системи зберігання палива. Прогнозування здійснюється для кожного танку по результатам його моніторингу.

Для підвищення ефективності експлуатації ємностей в системах зберігання палива використовуються оцінка потреб в паливі по агрегованим показникам, окремо по типам палива (дизельному паливу та мазуту). Послідовність кроків для отримання прогнозів по агрегованим показникам повністю відповідає розробленої структурі інтелектуальної системи прогнозування ПММ (рис.1).

Висновки. У статті розглянуто прогнозування на основі методів машинного навчання для систем моніторингу палива на судні. Інформаційна система складається з таких підсистем: підсистема збору та зберігання інформації, підсистема підготовки даних, підсистема аналізу та попередньої обробки даних, підсистема моделювання та підсистема прогнозування.

У підсистемі прогнозування інформаційної системи реалізовано модуль побудови прогнозів на основі базових альтернативних моделей. В якості базових використані наступні моделі: моделі ARIMA/SARIMA, моделі експоненційного згладжування, регресійні нейромережеві моделі та BSTS моделі. Для покращення показників якості прогнозів в підсистемі прогнозування були впроваджені методи комбінування прогнозів: метод простого усереднення, медіанний метод, метод мінімальної дисперсії, метод оберненого рангу, метод побудови регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменших квадратів, метод побудови регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменшого абсолютного відхилення і метод комбінування кількох регресійних моделей.

В експериментальній частині розглянуто завдання прогнозування обсягів можливого заповнення паливом танків в системі зберігання судна. Джерелом даних були звіти про рівень та кількість палива в резервуарах на судні. Розроблена інформаційна система дозволила отримати якісні прогнози по кожному з танків на судні та прогнозні значення по агрегованим показникам на основі різних типів палива. В результаті експерименту доведено, що при застосуванні трьох методів комбінування прогнозів (метод оберненого рангу, метод побудови регресійної моделі з коефіцієнтами підібраними методом найменшого абсолютного відхилення і метод комбінування кількох регресійних моделей) отримано підвищення якості прогнозів в середньому на 20%. Інтелектуальна

система прогнозування дозволяє отримувати високоякісні прогнози кількості палива на судні для резервуарів різних типів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Kalsi P., and Singh H., “Sensors Based Automotive vehicle for the detection of fuel level”. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 8(11), (2019): 1001-1004, doi:10.35940/ijitee.I7624.0981119.
2. Hüffmeier J., and Johanson M., “State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships”. *MDPI, J. Mar. Sci. Eng. Vol. 9(4)*, 447 (2021) <https://doi.org/10.3390/jmse9040447>.
3. Sondkar Sh., Patil O., Bhosale P., and Nyahalde P., “Diesel Level Monitoring System”, *International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology (IJRASET)*. Vol.12, issue 5, (2024) 4301-4306, doi.org/10.22214/ijraset.2024.62590.
4. Pradana M. F., “Enhancing Ship Fuel Efficiency in the Archipelago Area through a Combination of Speed Optimization and Flettner Rotor Implementation”. Thesis for: Doktor Ingenieur Advisor: Prof. Dr.-Ing. Bernd Noche. (2024), doi:10.17185/dupublico/82503.
5. Krishnasamy R., Aathi R., Jayapalan B., Karthikeyen K., and Nowfal M., “Automatic fuel monitoring system”, *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, issue 8 (2019) 348–352. doi:10.35940/ijrte.D1078.1284S219.
6. Obikoya G.D. “Design, construction, and implementation of a remote fuel-level monitoring system”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (2014): 76. doi:10.1186/1687-1499-2014-76.
7. Patel R., Pungalia H., and Mahajan S., “Flow Meter and Arduino Based Fuel Gauge for Automotive Vehicles”, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684, volume 13, issue 5, Ver. VII (2016) 85-92.
8. Safaei A.A., Ghassemi H., and Ghiasi M., “VLCC’s fuel consumption prediction modeling based on noon report and automatic identification system”. *Cogent engineering* (2019), 6: 1595292 <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1595292>.
9. Bialystocki N., and Konovessis D., “On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach”. *Journal of Ocean Engineering and Science*. Vol. 1 (2), (2016) 157-166.
10. Young-Rong K., Min J., and Jun-Bum P., “Development of a Fuel Consumption Prediction Model Based on Machine Learning Using Ship In-Service Data”. *MDPI, Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9(2), (2021) 137; <https://doi.org/10.3390/jmse9020137>.
11. Sheng-Long K., Wu-Hsun C., and Chao-Wei C., “AIS-Based Scenario Simulation for the Control and Improvement of Ship Emissions in Ports”. *J. Mar. Sci. Eng.* vol. 10(2), (2022) 129. <https://doi.org/10.3390/jmse10020129>.
12. Sun X., Ouyang Z., and Yue D., “Short-term load forecasting based on multivariate linear regression”. *Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China. (2017) 26-28. doi: 10.1109/EI2.2017.8245401.
13. Bidyuk P., Kalinina I., Gozhyj A., Pikh I., Chorna V., and Gozhyi V., “A Systematic Approach to Modeling and Forecasting based on Real Data in Machine Learning Tasks”.

Springer Nature Link. System Analysis and Data Mining Part of the book series: Studies in Systems, Decision and Control (SSDC, vol. 609) (2025) 71-87, doi:10.1007/978-3-031-97529-5_5.

14. Kalinina I., and Gozhyj A., “Forecasting electricity demand in Ukraine using machine learning methods”. CIAW-24: Computational Intelligence Application Workshop, October 10-12, 2024, Lviv, Ukraine. (2024) CEUR-WS.org/Vol-3861/paper4.pdf.

15. Bidyuk P., Kalinina I., Gozhyj A., Gozhyi V., and Shiyan S., “An approach to combining forecasts when solving machine learning problems”. MoMLeT-2025: 7th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies, June, 14, 2025, Lviv-Shatsk, Ukraine. CEUR-WS.org/Vol-4004/paper2.pdf.

Received 02.12.2025.

Accepted 08.12.2025.

Intelligent system for predicting parameters of fuel and lubricants.

The article considers an intelligent forecasting system for monitoring fuel volumes on a ship. The system solves the following monitoring tasks: data analysis and evaluation, model building and forecasting values for decision-making. The information system consists of the following subsystems: information collection and storage subsystem, data preparation subsystem, data analysis and pre-processing subsystem, modelling subsystem and forecasting subsystem. The forecasting subsystem provides a forecast value combination module, which implements seven different methods of combining forecast values. In most cases, combination helps to improve the quality of forecasts. The experimental part of the study considers the problem of predicting the volumes of possible filling of fuel storage systems based on a report on regular data collection on the level and amount of fuel in the tanks on a ship. The following machine learning methods were used for forecasting: ARIMA/SARIMA models, exponential smoothing, regression neural network models and BSTS models. The quality assessment of the obtained forecast values was carried out using the following quality metrics: MAE, MSE, RMSE. The information system allows you to obtain high-quality fuel quantity forecasts for tanks of various types, as well as generalized indicators.

Keywords: Intelligent forecasting system, machine learning methods, fuel monitoring, combining forecast values.

Калініна Ірина Олександрівна – професорка кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., проф..

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>

Шиян Сергій Іванович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9255-9511>

Гожий Віктор Олександрович – ст. викладач кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5341-0973>

Пастернак Лідія Юріївна – студентка магістратури IT STEP університету, м. Львів.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2172-0388>

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Associate Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Ph.D., associate professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8359-2045>

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Doc.of Ing.Sc., professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>

Shiyan Serhii Ivanovych – Postgraduate student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petera Mohyly.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9255-9511>

Gozhyi Viktor Oleksandrovyh – Senior Lecturer at the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University, Candidate of Technical Sciences.

ORCID: 0000–0002–5341–0973

Pasternak Lidiia Yuriivna – Master's student at IT STEP University, Lviv city.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2172-0388>

Я.А. Гончаров, Т.А. Зайцева

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТІЛ СКЛАДНОЇ ФОРМИ НА ОСНОВІ ІНТЕГРОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМ

Анотація: У роботі представлено підхід до розв'язання задач моделювання контактної взаємодії жорстких циліндричних штампів із пружним півпростором, що поєднує застосування Ansys для побудови та розрахунку скінченно-елементних моделей і MATLAB для розширеного постпроцесінгу та візуалізації. Особливістю роботи є інтегроване використання чисельних методів та засобів комп'ютерної візуалізації в різних програмних пакетах для аналізу контактної взаємодії штампів складної геометрії з пружним ізотропним однорідним півпростором. Розглядаються штампів з круговим, еліптичним та симетрично-здеформованим еліптичним кільцевим перерізом, що формує двозв'язну область контакту під дією центрального осьового тиску в умовах осесиметричної постановки задачі. У середовищі Ansys побудовано скінченно-елементні моделі з урахуванням геометричної складності штампів та виконано аналіз впливу параметрів дискретизації на якість розв'язку. Подальший постпроцесінг результатів здійснено в MATLAB, зокрема реалізовано побудову тривимірних візуалізацій та ізоліній поля контактної тиску. У межах запропонованого підходу проведено чисельне дослідження закономірностей осесиметричної контактної взаємодії тіл складної геометрії. Показано, що такий підхід є ефективним для аналізу результатів розв'язання задач контактної механіки. Розширені можливості візуалізації підвищують якість інтерпретації результатів, сприяють більш достовірній верифікації чисельних моделей і створюють основу для подальшої оптимізації конструктивних параметрів елементів технічних систем.

Ключові слова: чисельне моделювання, метод скінченних елементів, просторова контактна задача, штамп, постпроцесінг, візуалізація даних, напруження, осьовий тиск, Ansys, MATLAB, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Контактна взаємодія тіл складної геометрії належить до важливих задач механіки деформівного тіла, що мають широке застосування в прикладній механіці, машинобудуванні, біомеханіці та ін. Особливу складність становлять задачі, де конфігурації контактних областей мають геометричні особливості, зокрема двозв'язні структури, для яких аналітичні методи виявляються обмеженими. У таких випадках ефективним інструментом є метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований, наприклад, у середовищі Ansys, що забезпечує побудову дискретизованих моделей з урахуванням реальної геометрії, матеріальних характеристик і схем навантаження,

дозволяючи отримувати фізично коректні чисельні оцінки напружено-деформівного стану в зоні контакту.

Водночас точність і збіжність розв'язків істотно залежать від налаштувань контактних елементів та вибору чисельних алгоритмів, що потребує ретельного обґрунтування та аналізу результатів. Для розширеного аналізу доцільним є поєднане використання Ansys і MATLAB, коли другий стає інструментом для постпроцесінгу, статистичного аналізу, візуалізації та валідації. Можливість спільного моделювання між MATLAB і Ansys дозволяє інтегрувати складні матеріальні моделі та динаміку процесу в єдине обчислювальне середовище. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям цифрового інженерного аналізу та забезпечує гнучкість, масштабованість і підвищує точність при розв'язанні задач контактної механіки зі складною геометрією контакту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні підходи до практичних досліджень поєднують потужні промислові МСЕ-рішення з адаптивними інструментами постпроцесінгу [7]. Платформа Ansys забезпечує функціональність, необхідну для прикладних досліджень і виробничих процесів. [1], тоді як MATLAB забезпечує реалізацію специфічних аналітичних і візуалізаційних рішень [3, 4]. Особливості контактних елементів Ansys і вплив параметрів на якість розв'язку докладно розглянуто на прикладах у роботі [6]. У публікації [2] систематизовано програмно-алгоритмічні підходи до написання МСЕ-коду в MATLAB, зокрема розглянуто структуру типового програмного блоку, процедуру формування матриці жорсткості, накладання граничних умов і приклад розв'язання статичної задачі механіки деформівного пружного тіла. Як показано у дослідженні [5], поєднання Ansys для чисельного моделювання з MATLAB для розширеного постпроцесінгу формує ефективний і стабільний робочий процес.

У роботі [10] представлено відкритий MATLAB-код для реалізації методу скінченних елементів, що спрощує процес верифікації результатів, отриманих у середовищі Ansys, а також сприяє ефективному проведенню параметричних досліджень. Напружено-деформівний стан під подошвою фундаментів та анкерних елементів у ґрунтовому середовищі проаналізовано в [8], тоді як прикладні повномасштабні тривимірні задачі розглянуто у роботах [9, 11]. Крім того, у дослідженні [3] чисельно змодельовано взаємодію штампа з двозв'язною (у плані) контактною областю з пружним півпростором, проведено розрахунки і побудовано графіки.

Висвітлені приклади демонструють ефективність такого підходу як у моделюванні складних контактних взаємодій, так і в параметричних дослідженнях та верифікації чисельних результатів. Враховуючи зростаючу складність геометрії, матеріальних моделей і граничних умов, подальші дослідження у цьому напрямку є доцільними. Зокрема, перспективним є розвиток відкритих обчислювальних рішень, розширення бібліотек для постпроцесінгу, а також інтеграція адаптивних методів і машинного навчання для автоматизації аналізу та підвищення точності моделювання.

Постановка задачі. Розглядається контактна задача механіки деформівного твердого тіла, що описує процес вдавлювання абсолютно жорсткого циліндричного штампу з плоскою основою у однорідний ізотропний пружний півпростір. Взаємодія у зоні кон-

такту розглядається без тертя, при центральній прикладеній навантаженні вздовж осі симетрії, що відповідає режиму осьового стиску штампа. Поперечний переріз штампа має двозв'язну форму. Задачу дослідження і візуалізації результатів треба виконати для штампів у формі кругового кільця, еліптичного кільця і кільця обмеженого двома концентричними кривими у формі симетрично здеформованих еліпсів.

Мета дослідження. Формалізувати, чисельно реалізувати та верифікувати скінченно-елементні моделі вдавлювання абсолютно жорстких циліндричних штампів трьох видів поперечного перерізу: кругового кільця, еліптичного кільця та кільця, обмеженого двома концентричними кривими у формі симетрично здеформованих еліпсів, у однорідний ізотропний пружний півпростір. Для досягнення мети передбачено:

- побудову та валідацію MCE-моделей в Ansys з перевіркою на еталонних рішеннях (зокрема, для кругового кільця);
- розробку програмного забезпечення для інтеграції Ansys з MATLAB для розширеного постпроцесінгу чисельних результатів;
- аналіз отриманих даних та побудову графічних інтерпретацій результатів.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 представлено алгоритм розв'язання задачі моделювання контактної взаємодії як послідовність етапів, що поєднують постановку задачі, побудову моделі, чисельний розрахунок та подальшу обробку результатів. На початковому етапі формулюється математична постановка, визначаються основні параметри та умови задачі. Далі у середовищі Ansys формується скінченно-елементна модель, що включає побудову геометрії, задання матеріальних властивостей, налаштування контактних умов і дискретизацію досліджуваної зони. Після цього встановлюються граничні умови та навантаження, а у випадку недостатньої точності виконується уточнена дискретизація. Результати чисельного розв'язання перевіряються на збіжність та порівнюються з відомими рішеннями. У разі розбіжностей параметри моделі коригуються. Отримані дані готуються до подальшої обробки шляхом фільтрації, видалення нерелевантної інформації та експорту у формат Excel, після чого вони передаються у середовище MATLAB. На наступному етапі здійснюється інтерполяція з необхідною точністю та перевірка даних на наявність шумів чи аномалій. У разі потреби застосовуються процедури згладжування, після чого проводиться візуалізація.

Завершальним кроком є отримання повної картини контактної взаємодії, придатної для подальшого аналізу та інтерпретації. Таким чином, наведений алгоритм у вигляді блок-схеми відображає повну послідовність дій – від математичної постановки задачі та побудови скінченно-елементної моделі до експорту результатів і їхньої обробки у середовищі MATLAB. Для практичної реалізації цього підходу авторами було розроблено низку програмних фрагментів коду, які забезпечують автоматизацію обробки, інтерполяцію та подальшу візуалізацію результатів.

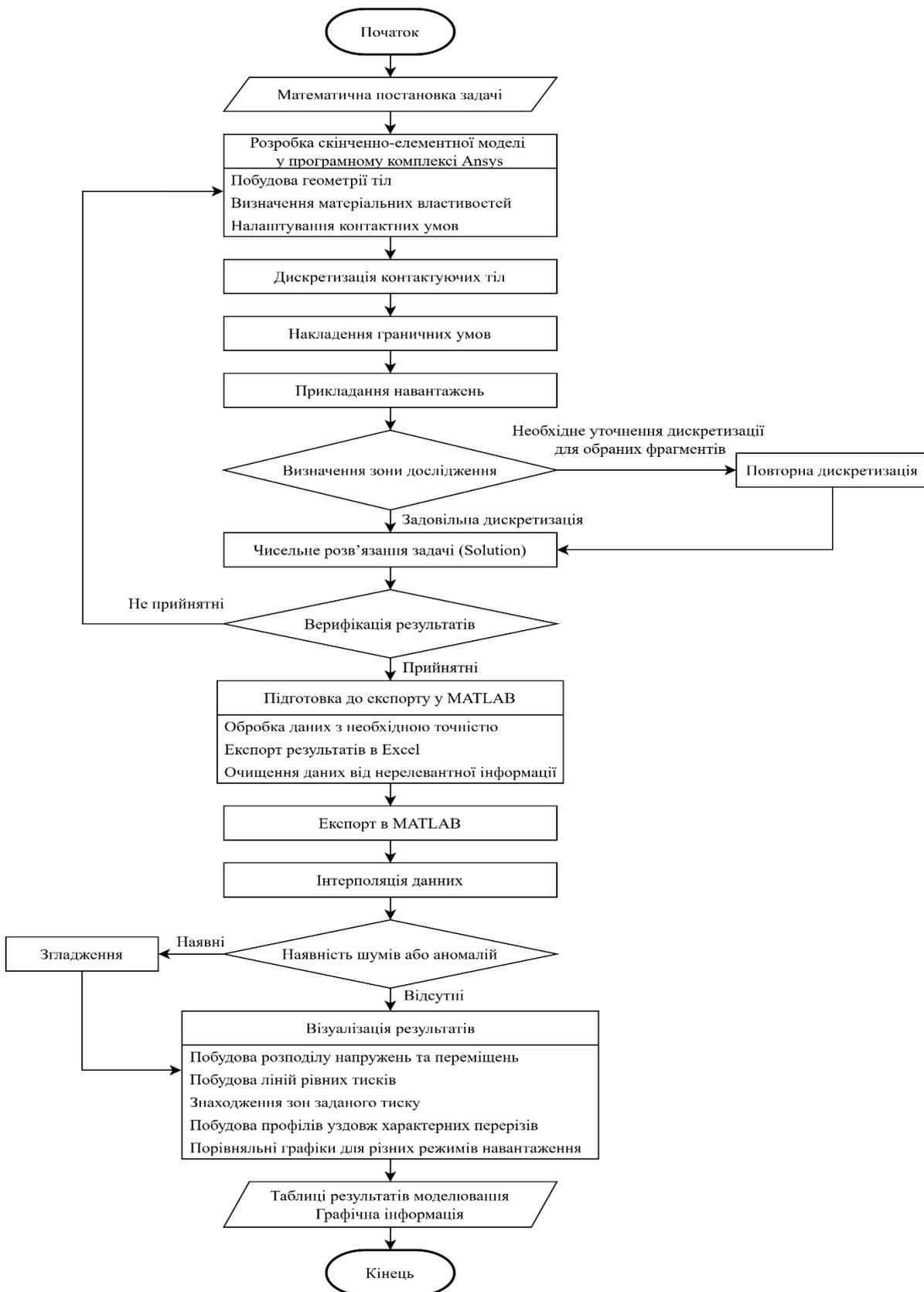


Рисунок 1 - Алгоритм моделювання задачі контактної взаємодії

Нижче наведено приклади окремих фрагментів коду із поясненням їх функціонального призначення. Спочатку програма здійснює імпорт і підготовку даних, отриманих за допомогою програмного комплексу Ansys, для подальшої обробки:

```
clearvars; clc;  
filePath = 'B:\Aspirant\Data\Circle.xlsx';  
raw = readmatrix(filePath, 'Range', 'A:C');  
X = raw(:,1); Y = raw(:,2); Z = raw(:,3);
```

Нижче представлено фрагменти програмного коду, призначені для побудови 2D- і 3D-візуалізації оброблених даних у різних форматах:

1. 3D-візуалізація забезпечує цілісне уявлення про просторовий вигляд поля тисків або деформацій, сприяючи інтуїтивному аналізу форми контактної зони, глибини втиснення, симетрії та розподілу по об'єму:

```
subplot(2,2,1);  
surf(Xq, Yq, -Zf1, 'EdgeColor','none');  
view(3); axis vis3d; grid off; xticks([]); yticks([]);  
zticks([]);  
xlabel('X \rightarrow'); ylabel('Y \rightarrow'); zlabel('Z  
\downarrow');  
title('3D-огляд');
```

2. 2D-візуалізація – для площини OXZ:

```
subplot(2,2,2);  
surf(Xq, Yq, -Zf1, 'EdgeColor','none');  
view(0,0); axis vis3d; grid off; xticks([]); yticks([]);  
zticks([]);  
xlabel('X \rightarrow'); ylabel('Y \rightarrow'); zlabel('Z  
\downarrow');  
title('OXZ');
```

3. 2D-візуалізація – для площини OYZ:

```
subplot(2,2,3);  
surf(Xq, Yq, -Zf1, 'EdgeColor','none');  
view(90,0); axis vis3d; grid off; xticks([]); yticks([]);  
zticks([]);  
xlabel('X \rightarrow'); ylabel('Y \rightarrow'); zlabel('Z  
\downarrow');  
title('Боковий вигляд (Y)');
```

4. 2D-візуалізація – для площини OXY.

```
subplot(2,2,4);  
surf(Xq, Yq, -Zf1, 'EdgeColor','none');  
view(0,90); axis vis3d; grid off; xticks([]); yticks([]);  
zticks([]);  
xlabel('X \rightarrow'); ylabel('Y \rightarrow'); zlabel('Z  
\downarrow');  
title('Вигляд згори');  
exportgraphics(f2, [name '_3D.png'], 'Resolution', 300);
```

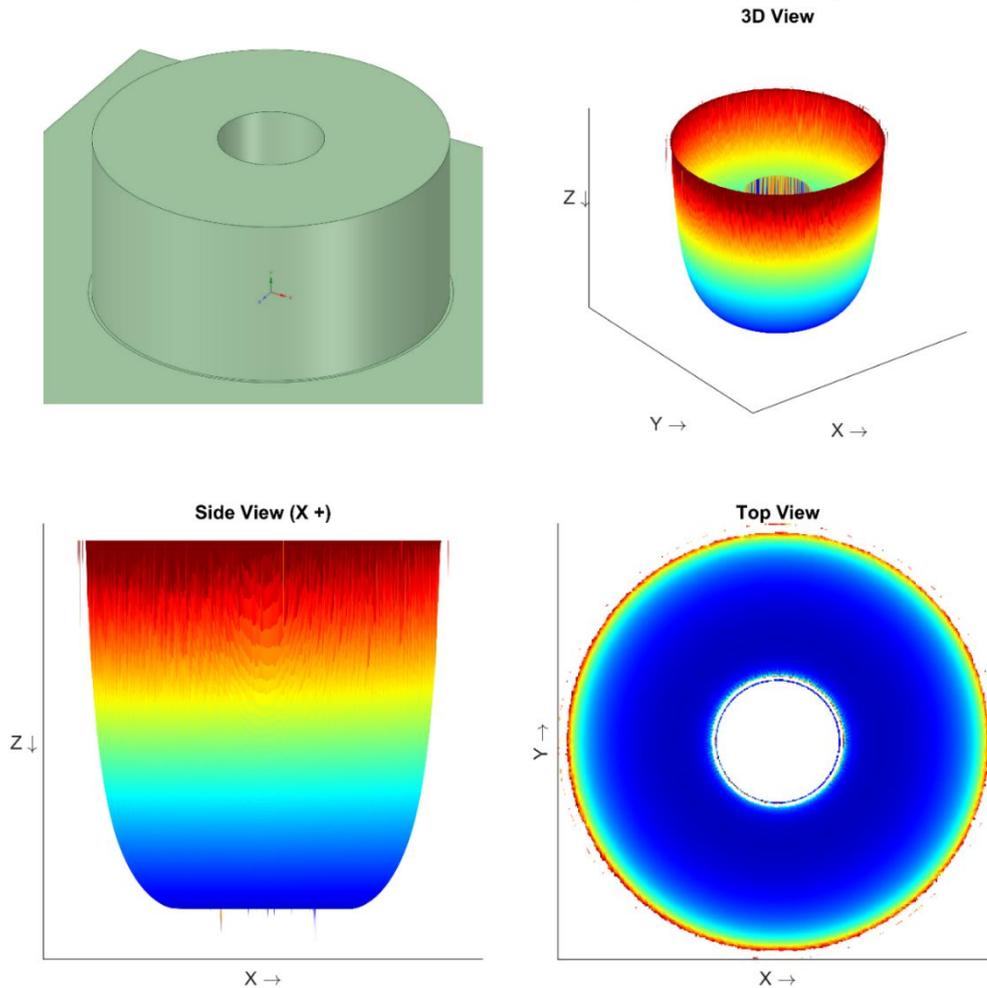


Рисунок 2 - Розподіл нормального тиску під круговим кільцевим штампом $r_1/r_2=0.3$

Було розглянуто контактні задачі, що описують процес вдавлювання абсолютно жорсткого циліндричного штампу з плоскою основою у однорідний ізотропний пружний півпростір.

Взаємодія у зоні контакту відбувалась без тертя, а навантаження було прикладене центрально, тобто уздовж осі симетрії штампу. Поперечний переріз штампа займав двозв'язну форму. Задачі дослідження і візуалізації результатів було виконано для штамсів у формі кругового кільця, еліптичного кільця і кільця обмеженого двома концентричними кривими у формі симетрично zdeформованих еліпсів.

Для випадку штампу у формі кругового кільця розподіл нормального тиску представлено на рис. 2. У полярній системі координат рівняння границі у загальному вигляді буде приймати вигляд $\rho_1=r_1$ та $\rho_2=r_2$, $r_1 < r_2$.

Для штампа у формі еліптичного кільця розподіл нормального тиску представлено на рис. 3.

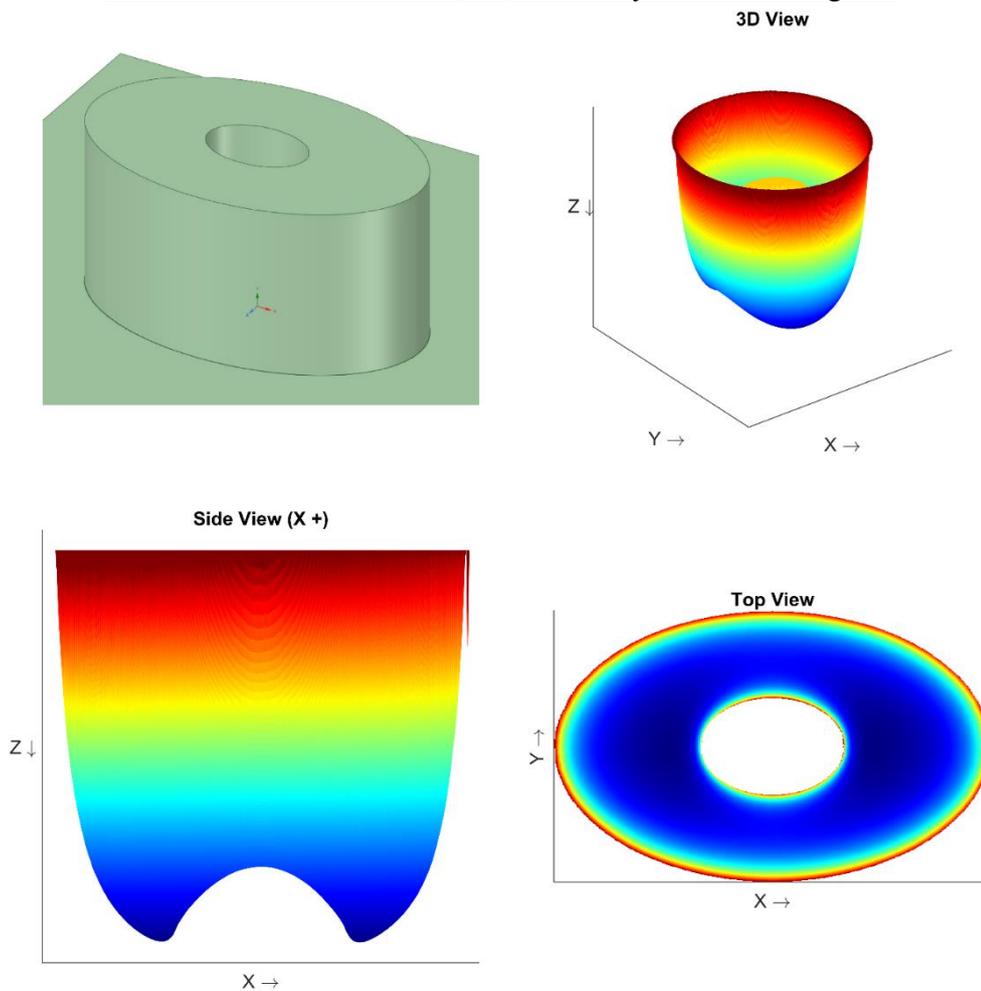


Рисунок 3 - Розподіл нормального тиску під еліптичним кільцевим штампом
 $a_1/b_1 = 0.3$, ексцентриситет $\epsilon=0.8$

Якщо прийняти фокус еліпса за полюс, а велику вісь – за полярну вісь, то його рівняння в полярних координатах (ρ, φ) матиме вигляд

$$\rho_1^2 = \frac{a^2(1 - \epsilon^2)}{1 - \epsilon^2 \cos(\varphi)}$$

$$\rho_2^2 = \frac{b^2(1 - \epsilon^2)}{1 - \epsilon^2 \cos(\varphi)}$$

$$\epsilon^2 = 1 - \frac{a_1^2}{a_2^2} = 1 - \frac{b_1^2}{b_2^2}$$

де a та b – фокальні параметри, ϵ - ексцентриситет еліпсів, ρ – полярний радіус, $a_1 < b_1, b_1 < b_2, a_1 < a_2$.

Для штампа у формі кільця обмеженого симетрично zdeформованими еліпсами, розподіл нормального тиску представлено на рис. 4.

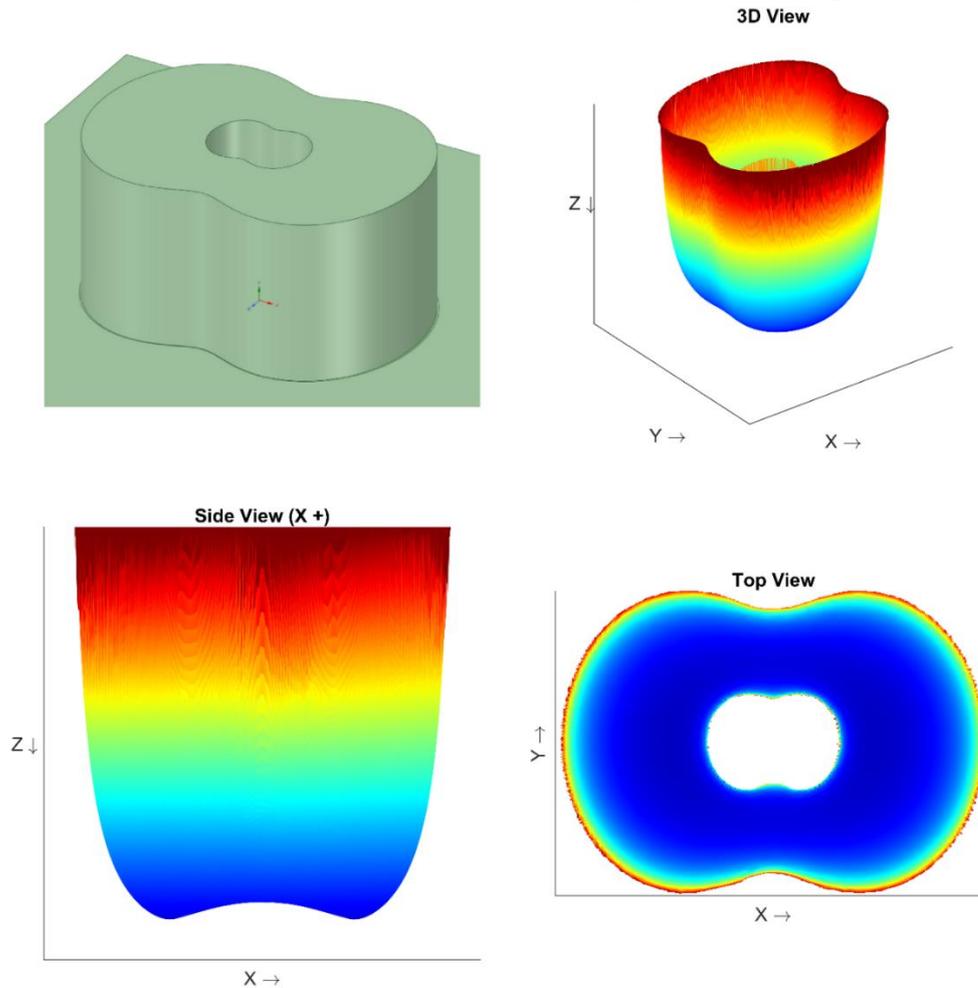


Рисунок 4 - Розподіл нормального тиску під формі симетрично zdeформованими еліптичними кільцями $a_1/b_1 = 0.3$

$$\rho_1 = a \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2(\varphi)}.$$

$$\rho_2 = b \sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2(\varphi)}.$$

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{a_1^2}{a_2^2} = 1 - \frac{b_1^2}{b_2^2}$$

ε - ексцентриситет еліпсів, a_1, b_1 – великі; a_2, b_2 – малі півосі еліпсів. $a_1 < b_1, b_1 < b_2, a_1 < a_2$.

У якості прикладу на рис. 5 наведено порівняння залежностей нормального тиску вздовж осі OX для штампів у формі кругового кільця (суцільна крива) та еліптичного кільця (штрихова крива $\varepsilon=0.8$) з шириною кільця 0.3.

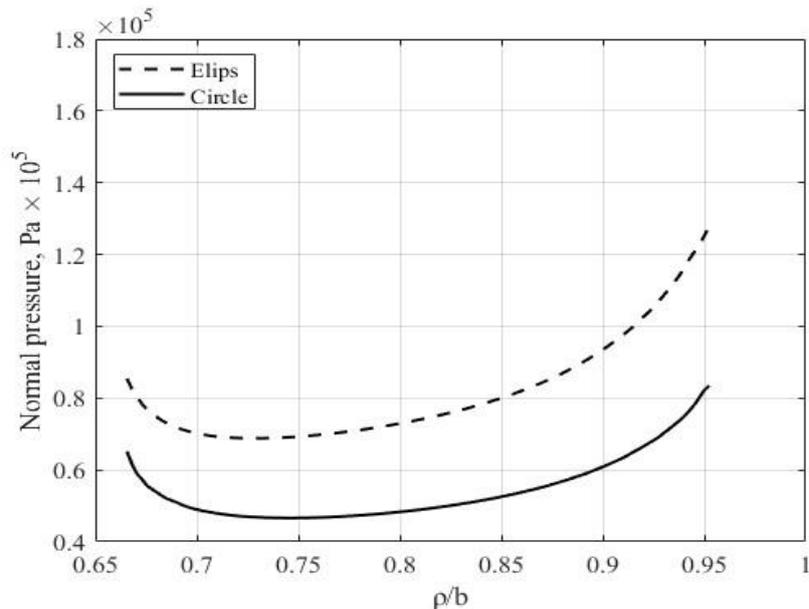


Рисунок 5 - Розподіл нормальних тисків під штампами різної форми

Із графіка видно, що більші значення тиску спостерігаються під штампом еліптичної форми. Обидві криві мають аналогічну форму. Тиск досягає мінімальних значень у центральній частині контактної області та монотонно зростає у напрямку до її границь, причому на внутрішній зростання є більш пологим, ніж на зовнішній границі.

Висновки. У роботі представлено підхід до моделювання задач контактної взаємодії штампа складної геометрії з пружним півпростором, що поєднує можливості МСЕ, реалізованому у середовищі Ansys та подальшу обробку результатів у MATLAB. Запропонований алгоритм дозволив реалізувати повний цикл дослідження – від математичної постановки та побудови моделі до візуалізації розподілів напружень і тиску. Для задач вдавлювання абсолютно жорсткого циліндричного штампу з плоскою основою у однорідний ізотропний пружний півпростір, коли навантаження прикладене центрально, тобто уздовж осі симетрії штампу, а поперечний переріз штампа має двозв'язну форму, виконано дослідження розв'язання і візуалізації результатів. Задачі розв'язано для штампів у формі кругового кільця, еліптичного кільця і кільця обмеженого двома концентричними кривими у формі симетрично zdeформованих еліпсів. Отримані результати підтверджують дієвість застосованого підходу. Виконані чисельні експерименти показали універсальність розробленої методики та можливість її використання для аналізу контактних задач з довільною геометрією штампів.

Можна вважати що запропонований підхід застосування програмних засобів Ansys, MATLAB у поєднанні з власно розробленим програмним забезпеченням є достатньо гнучким і може бути адаптовано до інших класів контактних задач, використано для порівняння конструктивних рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ansys Free Student Software Downloads –
URL: <https://www.ansys.com/academic/freestudent-products> (дата звернення: 18.02.2022).
2. Chessa J. Programming the Finite Element Method with MATLAB [Electronic resource]. – 2002. – URL: https://www.math.purdue.edu/~caiz/math615/matlab_fem.
3. Honcharov Y. A., Zaytseva T. A. 2023. Computer Simulation of the Interaction of a Doubly Bound in the Plane of a Punch and an Elastic Half-Space. Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling 23: 46–52. doi:10.15421/322331
4. MATLAB – URL: <https://uk.mathworks.com/products/matlab/student.html> (дата звернення: 27.06.2022).
5. Schemmel R., Krieger V., Hemsel T., Sextro W. (2021). Co-simulation of MATLAB and Ansys for ultrasonic wire bonding process optimization. Microelectronics Reliability, 119, 114077. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114077.
6. Sezer S. An evaluation of Ansys contact elements // Master's thesis, Louisiana State University. – 2005. – URL: https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/.
7. Shamim R. An Overview of Contact Mechanics Algorithms // School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China. – 2024. –
URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13681433>.
8. Shapoval V. G., Kolos M. V., Chernomorov A. P. Contact tensions under the sole of rigid deep laying foundations and ground anchors // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2023. – No. 2. – P. 58–63. –
URL: https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2023/2/02_2023_Shapoval.pdf.
9. Shyshkanova, G., Zaytseva, T., Zhushman, V., Levchenko, N., & Korotunova, O. (2023, October). Solving three-dimensional contact problems for foundation design in green building. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2609, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
10. Wang B., Bai J., Lu S., Zuo W. (2025). An open-source MATLAB solver for contact finite element analysis (large deformation, frictional contact). Advances in Engineering Software, 103798. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2024.103798.
11. Šulka, P., et al. (2018). Static structural analysis of rolling ball bearing. MATEC Web of Conferences, 244. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401023>

REFERENCES

1. Ansys Free Student Software Downloads –
URL: <https://www.ansys.com/academic/freestudent-products> (дата звернення: 18.02.2022).
2. Chessa J. Programming the Finite Element Method with MATLAB [Electronic resource]. – 2002. – URL: https://www.math.purdue.edu/~caiz/math615/matlab_fem.
3. Honcharov Y. A., Zaytseva T. A. 2023. Computer Simulation of the Interaction of a Doubly Bound in the Plane of a Punch and an Elastic Half-Space. Problems of Applied Mathematics and Mathematical Modeling 23: 46–52. doi:10.15421/322331
4. MATLAB – URL: <https://uk.mathworks.com/products/matlab/student.html> (дата звернення: 27.06.2022).

5. Schemmel R., Krieger V., Hemsel T., Sextro W. (2021). Co-simulation of MATLAB and Ansys for ultrasonic wire bonding process optimization. *Microelectronics Reliability*, 119, 114077. DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114077.
6. Sezer S. An evaluation of Ansys contact elements // Master's thesis, Louisiana State University. – 2005. – URL: https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/.
7. Shamim R. An Overview of Contact Mechanics Algorithms // School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13681433>.
8. Shapoval V. G., Kolos M. V., Chernomorov A. P. Contact tensions under the sole of rigid deep laying foundations and ground anchors // *Scientific Bulletin of National Mining University*. – 2023. – No. 2. – P. 58–63. – URL: https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2023/2/02_2023_Shapoval.pdf.
9. Shyshkanova, G., Zaytseva, T., Zhushman, V., Levchenko, N., & Korotunova, O. (2023, October). Solving three-dimensional contact problems for foundation design in green building. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2609, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
10. Wang B., Bai J., Lu S., Zuo W. (2025). An open-source MATLAB solver for contact finite element analysis (large deformation, frictional contact). *Advances in Engineering Software*, 103798. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2024.103798.
11. Šulka, P., (2018). Static structural analysis of rolling ball bearing. *MATEC Web of Conferences*, 244. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401023>

Received 02.12.2025.
Accepted 08.12.2025.

Numerical Investigation of the Contact Interaction of Complex-Shaped Bodies Using Integrated Computational Platforms

The paper presents an approach to solving problems of numerical modeling of the contact interaction between rigid cylindrical punches and an elastic half-space, which combines the use of Ansys for constructing and solving finite element models with MATLAB for advanced postprocessing and visualization of the obtained results. A distinctive feature of the study is the integrated use of numerical methods and computer visualization tools in different software environments to analyze the contact interaction of punches of complex geometry with an isotropic homogeneous elastic half-space. The analysis focuses on punches with circular ring, elliptical ring, and symmetrically deformed elliptical ring cross-sections, which form a doubly connected contact region under the action of a centrally applied load in an axisymmetric problem formulation, i.e., under axial compression applied along the punch axis. Within the Ansys environment, finite element models were constructed with explicit consideration of the geometric complexity of the punches, and a systematic analysis of the influence of discretization parameters on the quality and stability of the numerical solution was carried out. This made it possible to clarify the requirements for the mesh in the vicinity of the contact zone and to obtain displacement and stress fields that are suitable for further detailed interpretation. The subsequent postprocessing of the numerical results was performed in MATLAB, where three-dimensional visualizations and contour plots of the contact pressure field were implemented, allowing for a clearer representation of the spatial structure and lo-

calization of stress concentrations in the contact region. Within the proposed approach, a numerical study of the regularities of axisymmetric contact interaction of bodies of complex geometry was carried out, and it was demonstrated that the combined Ansys–MATLAB workflow is effective for analyzing the results of contact mechanics problems. The extended visualization capabilities improve the quality of interpretation of the numerical data, support more reliable verification of the finite element models, and form a basis for the subsequent optimization of the structural parameters of elements of technical systems operating under contact loading.

Keywords: numerical modeling, finite element method (FEM), three-dimensional contact problem, punch, post-processing, data visualization, stresses, axial compression, Ansys, MATLAB, software tools.

Гончаров Ярослав Антонович – аспірант кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8994-8895>

Зайцева Тетяна Анатоліївна – канд. техн. наук, доцент, зав. каф. комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-3390>

Yaroslav Antonovych Honcharov – Ph.D. student, Department of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8994-8895>

Tetyana Anatoliivna Zaytseva – Candidate of Technical Sciences, Ass.Professor, Head of the Department of Computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-3390>

Vik. Hnatushenko, I. Udovyk, C. Heipke, M. Hnatushenko

APPLYING MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ANALYZE FOREST FIRE IMPACTS ON SENTINEL-2 IMAGERY ACROSS UKRAINE

Abstract. Forest fires pose severe ecological and socio-economic threats, necessitating efficient tools for rapid damage assessment. This study presents a machine learning approach for detecting burnt forest areas in Ukraine using multispectral Sentinel-2 imagery. A new manually annotated dataset was developed for training semantic segmentation models, addressing the scarcity of open data for the region. The proposed convolutional neural network, based on an encoder–decoder architecture with Xception blocks, effectively captures spectral patterns associated with fire damage. Experiments conducted on Sentinel-2 Level-2A imagery of the Kinburn Peninsula (October 2022) demonstrate high detection performance, achieving an Intersection over Union (IoU) of 95%. The results confirm the model’s capability for accurate burnt-area mapping and highlight its potential for broader applications in regional fire monitoring and environmental management.

Keywords: Burnt Forest Area Detection, Machine Learning, Convolutional Neural Networks, Spectral Bands, Ukraine Forests

Introduction/Background. Forest fires annually cause significant damage in Ukraine and worldwide, destroying thousands of hectares of forests and deteriorating their water-protective, soil-retaining, CO₂-storing and other beneficial properties. Such events disrupt the planned forestry operations and the use of forest resources, leading to substantial economic, social, and ecological losses. Besides the direct impact of fires [1], the state of forests depends on a complex of additional factors, which can be altered by fire: abiotic factors (climate and soil-hydrological conditions), biotic factors (diseases and pests of the forest), anthropogenic factors (recreation, environmental pollution, transformation of ecological conditions, etc.).

Burnt forest area detection is a crucial and complex problem that requires the use of accurate, reliable, and efficient methods. The main challenges for this task can be divided into the following categories [2]: early detection, detection accuracy, prediction and monitoring, necessary resources, and further constraints (logistics etc.). Traditional methods such as ground patrols or aerial photography are not sufficiently effective in solving these problems:

- Ground patrols are limited in their range and may not detect a fire in time, especially in large and inaccessible forest areas.
- Aerial photography, although covering larger areas in a short time, is expensive and dependent on weather conditions.

In recent years, there has been an increasing focus on the application of modern technologies such as satellite remote sensing and machine learning across various domains, including monitoring forest fires, mapping flood events, and damage cartography. Satellite remote sensing enables the collection of forest fire data over extensive areas and in real-time, significantly enhancing the speed and accuracy of burnt fire area detection. High-resolution datasets have facilitated the development and application of numerous forest fire mapping methods [3]. Primarily, these methods focus on detecting changes by creating carefully selected input data characteristics [4]. Machine learning, particularly neural networks, assists in rapidly analyzing large volumes of data and in identifying complex patterns indicative of fire presence [5,6].

The detection and analysis of forest fire outbreaks is a costly and complex process without specialized automated tools. This has led to efforts to create automated systems for detecting and assessing forest fires globally. A key direction in the creation of such systems is the development of methods for processing satellite data and creating extensive fire datasets using multispectral Sentinel-2 imagery, suitable for segmentation models. This significantly simplifies the process of assessing areas covered by fire and enhances the accuracy of the assessments.

Materials and Methods. Our comprehensive workflow for identifying burnt forest areas using multispectral Sentinel-2 data, from the perspective of machine learning technology application, consists of the following stages:

- Manual creation of a dataset on burnt forest areas (we use images of the Kinburn Peninsula of Ukraine), based on multispectral Sentinel-2 imagery suitable for machine learning-based semantic segmentation models [7,8].
- Conducting a series of experiments to evaluate the effectiveness of neural network semantic segmentation models for monitoring and detecting burnt forest areas.
- Testing a pre-trained neural network capable of detecting burnt forest areas from Sentinel-2 images.

Considering the dynamic nature of natural processes, it was inferred that the satellite data from Sentinel-2A and Sentinel-2B offer a well-balanced combination of spatial, spectral, and temporal indicators. Sentinel data come at two different levels of processing: level-1C and level-2A. The level-1C product includes measurements of top-of-atmosphere (TOA) reflectance and the parameters required to convert them into radiances. Additionally, it provides multispectral registration at a sub-pixel level. On the other hand, the level-2A product provides subpixel multispectral registration and orthorectified bottom-of-atmosphere reflectance. This makes level-2A the more favorable choice.

In the advancement of burnt forest area detection methodologies, a specialized convolutional neural network (CNN) architecture has been developed to capitalize on the spectral properties of Sentinel-2 multispectral imagery [9]. The architecture is grounded in an encoder-decoder framework, meticulously crafted to execute semantic segmentation with high accuracy.

At the core of the CNN architecture lies the encoder, which is designed to methodically extract spectral features from the input data. Through a succession of convolutional layers, the encoder progressively diminishes the spatial dimensions while concurrently expanding the feature map depth. This deliberate reduction and enrichment process is essential for isolating the spectral signatures that are indicative of and land cover class, including wildfire-affected regions.

Transitioning from the encoder, the middle layer of the network serves as an enhancement conduit for the encoded features. Crucially, it retains the spatial dimensions of the feature set, thereby safeguarding the contextual information of the imagery, which is vital for the decoding phase.

The decoder component of the architecture is tasked with the spatial reconstruction of the feature set. It employs a series of decoding blocks that systematically increase the tensor's resolution. This is achieved through transposed convolutions that work in concert with features carried over from the encoder, enabling precise localization of the affected areas.

A defining element of the network's architecture is the integration of Xception blocks. These blocks utilize the concept of depthwiseseparableconvolutions [10], allowing for the independent processing of spatial and channel features. This approach not only curtails the number of parameters within the model but also significantly enhances computational efficiency. Such efficiency is paramount when dealing with the intricate task of burnt forest area detection, where the model must discern subtle spectral discrepancies indicative of fire damage.

The architectural design of the CNN, with its incorporation of Xception blocks within the encoder-decoder framework, equips the model with the capability to perform real-time burnt forest area detection and monitoring. It is adapted to the dynamic and diverse conditions presented by natural landscapes, ensuring that the segmentation of wildfire-affected areas is both precise and computationally efficient.

Experiments and Discussion. The test area for carrying out the experiments is the Kinburn Peninsula in Ukraine, which separates the Dnieper-Bug estuary from the Black Sea, see Figure 1. A fire was identified in Sentinel-2 satellite imagery acquired on 04.10.2022. As a result of the outbreak of fires in forested areas and fields, nearby settlements were evacuated. According to the State Emergency Service of Ukraine <https://dsns.gov.ua/en>, the majority of fires in the territory during the considered period were provoked by missile strikes, leading to chaotic locations of the fires. Consequently, the affected regions are typically non-overlapping and do not coalesce in most instances.

Further Sentinel-2 images were taken during the burning fire with a cloud of smoke, which complicated data processing. The images were acquired from the official website of the United States Geological Survey (USGS) (USGS. Sentinel-2 Missions: Sentinel-2 Levels of Processing. <https://earthexplorer.usgs.gov/>). We manually examined the Sentinel-2 level 2-A imagery to identify images captured with less than 1% cloud cover when the affected area was imaged, and then selected the three bands B04, B03 and B02 for further processing.

The neural network, designed for burnt forest area detection from satellite imagery, was trained using the PyTorch library. The dataset for this task included 12 training patches and 3

validation patches representing the result of a burnt areas. Ground truth, which was used for training, validation and testing, was collected manually from the imagery. Commencing with the Adam optimizer, the network's learning rate was set at 0.001. The training was conducted over 50 epochs, with a batch size of 16, carefully chosen to balance computational efficiency and gradient calculation accuracy. To reduce the effects of overfitting, the training incorporated regularization techniques such as Dropout, applied at a rate of 0.5, to enforce the learning of robust features. Early Stopping [11] was utilized, ceasing training if no improvement in validation loss was noted over a span of 10 epochs.

The model's performance was assessed using the Intersection over Union (IoU) metric, which evaluates the precision of the segmentation predictions. The model with the lowest validation loss was selected for future application in burnt forest area detection tasks.

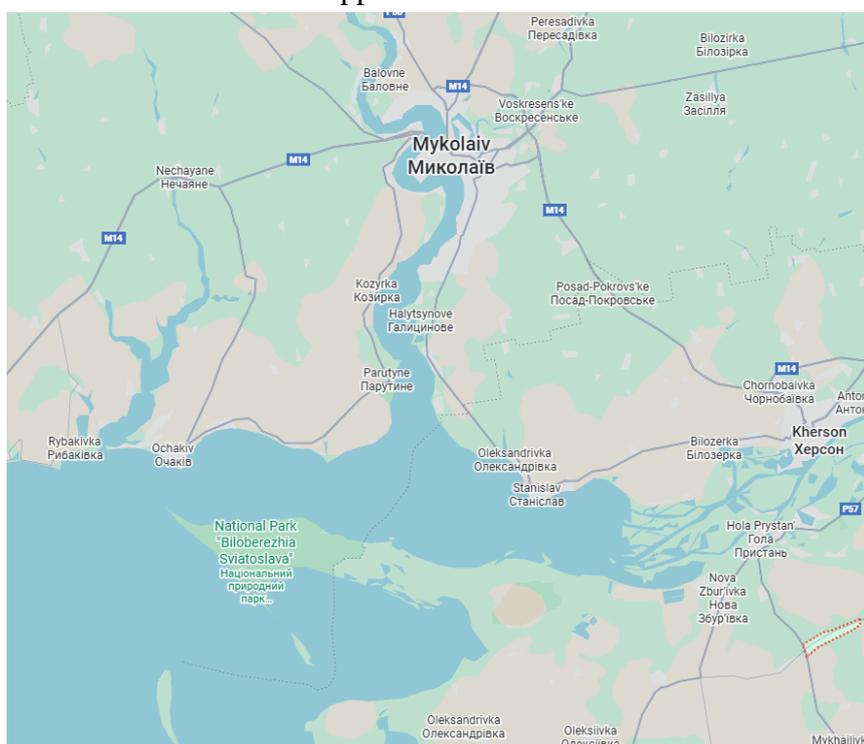


Figure 1 - Kinburn Peninsula (centre) in the Mykolaiv region, Ukraine

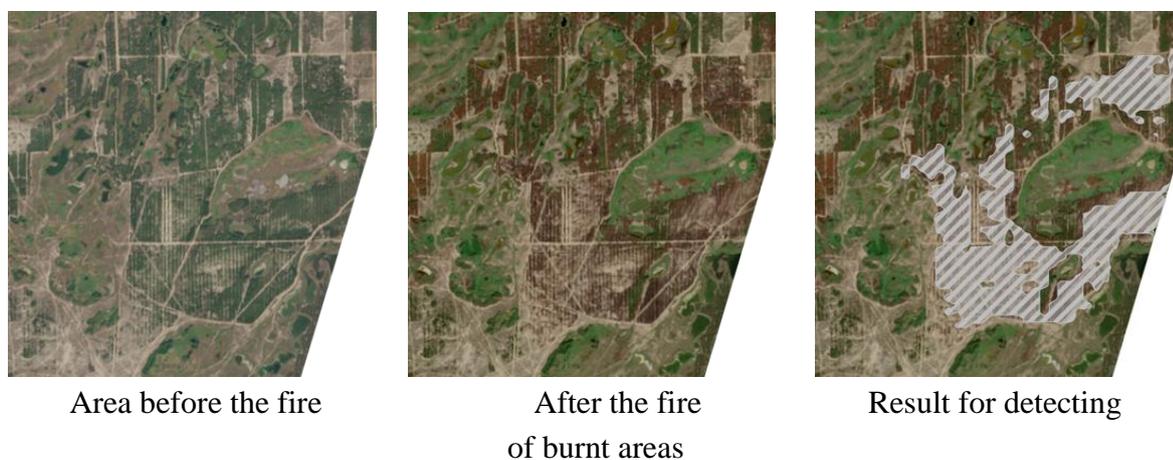


Figure 2 - The territories covered by fire on the Kinburn Peninsula

Evaluating the precision of identifying wildfire locations in Figure 2 is an essential step. This can be done by comparing the detection results to a reference mask using established measurement indices. In this work we refrained from measuring the overall accuracy (OA) due to its susceptibility to unburned pixels, as the dominance of unburned classes in such imbalanced datasets adversely affects the results. For instance, if the burned area accounts for just 10% of the entire image while the unburned area constitutes 90%, even without detecting any burned area, the model appears to be 90% accurate.

Instead, our assessment involves analyzing both the visual appearance and numerical measures of the results. The intersection over union (IoU), also known as the Jaccard Index [12], was employed to assess the accuracy of the segmentation outcomes.

Results and Conclusion. One challenge for image segmentation models utilizing machine learning is the need for accessible sets of publicly available training data to identify features and extract them for making accurate decisions. This is particularly the case for countries and regions that are less studied in the context of forest fire ecology, such as Ukraine. In this study, a dataset on forest fires in Ukraine was created using multispectral Sentinel-2 imagery to develop a remote sensing model for image segmentation, object detection, and classification of burnt forest areas. This dataset supports binary classification for detecting burnt and unburnt areas.

The method presented utilizes result of the burnt areas detection from Sentinel-2A satellite data, offering the best current compromise between spatial, spectral, and temporal resolution among publicly available satellite data, with the aid of convolutional neural networks. Results of the conducted experiments using the created dataset and proposed ML architecture demonstrate an IoU of 95% for the Kinburn Peninsula (Ukraine) for the developed detection model.

Future research will address the challenge of often unbalanced datasets, such as classes with fewer pixels. Multitemporal series of satellite images will be employed to gain more detailed information about the conditions leading to forest fires (e.g., bombardments) and to provide insights into land cover types. Furthermore, efforts will be made to generalize these results to more extensive and larger test sites and to train a neural network to classify the degree of fire impact, which will necessitate field validation.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zibitsev, Sergiy & Soshenskyi, Oleksandr & Myroniuk, Viktor & Gumeniuk, Vasyl. (2020). Wildfire in Ukraine: an overview of fires and fire management system. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 11. 15-31. 10.31548/forest2020.02.015.
2. Barmpoutis, Panagiotis & Papaioannou, Periklis & Dimitropoulos, Kosmas & Nikos, Grammalidis. (2020). A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*. 20. 6442. 10.3390/s20226442.
3. Hu, X., Ban, Y., & Nascetti, A. (2021). Uni-Temporal Multispectral Imagery for Burned Area Mapping with Deep Learning. *Remote Sensing*, 13(8), 1509. <https://doi.org/10.3390/rs13081509>

4. Hnatushenko, V., Hnatushenko, V., Soldatenko, D., and Heipke, C. (2023). Enhancing the quality of CNN-based burned area detection in satellite imagery through data augmentation, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W2-2023(pp.1749–1755).
5. Knopp, L., Wieland, M., Rättich, M., & Martinis, S. (2020). A Deep Learning Approach for Burned Area Segmentation with Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 12(15), 2422. <https://doi.org/10.3390/rs12152422>.
6. Hnatushenko, Vik., Honcharov, O. (2024). Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models. *Information Technology and Implementation*, Kyiv, Ukraine, 2024, p.1-18. <https://ceur-ws.org/Vol-3983/paper11.pdf>
7. Chaurasia, Kuldeep & Nandy, Rijul & Pawar, Omkar & Singh, Ravi & Ahire, Meghana. (2021). Semantic segmentation of high-resolution satellite images using deep learning. *Earth Science Informatics*. 14. 1-10. 10.1007/s12145-021-00674-7.
8. М.С. Міщенко, Вік. В. Гнатушенко, А.В. Сінгер. Класифікація екооб'єктів на супутникових зображеннях за допомогою PYTORCH// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4(153). – Дніпро, 2024. – С.102-109 , DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-153-2024-10>
9. Abdi, A. M. (2020). Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*, 57(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1650447>
10. Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1251-1258). doi: 10.1109/CVPR.2017.195.
11. Li, M., Soltanolkotabi, M., & Oymak, S. (2020). Gradient descent with early stopping is provably robust to label noise for overparameterized neural networks. In *International conference on artificial intelligence and statistics* (pp. 4313-4324). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.11680>.
12. Carass, A., Roy, S., Gherman, A., Reinhold, J. C., Jesson, A., Arbel, T., ... & Oguz, I. (2020). Evaluating white matter lesion segmentations with refined Sørensen-Dice analysis. *Scientific reports*, 10(1), 8242. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64803-w>

REFERENCE

1. Zibtsev, Sergiy & Soshenskyi, Oleksandr & Myroniuk, Viktor & Gumeniuk, Vasyl. (2020). Wildfire in Ukraine: an overview of fires and fire management system. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 11. 15-31. 10.31548/forest2020.02.015.
2. Barmpoutis, Panagiotis & Papaioannou, Periklis & Dimitropoulos, Kosmas & Nikos, Grammalidis. (2020). A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*. 20. 6442. 10.3390/s20226442.
3. Hu, X., Ban, Y., & Nascetti, A. (2021). Uni-Temporal Multispectral Imagery for Burned Area Mapping with Deep Learning. *Remote Sensing*, 13(8), 1509. <https://doi.org/10.3390/rs13081509>

4. Hnatushenko, V., Hnatushenko, V., Soldatenko, D., and Heipke, C. (2023). Enhancing the quality of CNN-based burned area detection in satellite imagery through data augmentation, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W2-2023(pp.1749–1755).
5. Knopp, L., Wieland, M., Rättich, M., & Martinis, S. (2020). A Deep Learning Approach for Burned Area Segmentation with Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 12(15), 2422. <https://doi.org/10.3390/rs12152422>.
6. Hnatushenko, Vik., Honcharov, O. (2024). Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models. *Information Technology and Implementation*, Kyiv, Ukraine, 2024, p.1-18. <https://ceur-ws.org/Vol-3983/paper11.pdf>
7. Chaurasia, Kuldeep & Nandy, Rijul & Pawar, Omkar & Singh, Ravi & Ahire, Meghana. (2021). Semantic segmentation of high-resolution satellite images using deep learning. *Earth Science Informatics*. 14. 1-10. 10.1007/s12145-021-00674-7.
8. M., Mishchenko & Vik, Hnatushenko & Anastasiia-Dzhei, Sinher. (2024). Implementation of satellite image classification using PyTorch. *System technologies*. 4. 102-109. 10.34185/1562-9945-4-153-2024-10.
9. Abdi, A. M. (2020). Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*, 57(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1650447>
10. Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1251-1258). doi: 10.1109/CVPR.2017.195.
11. Li, M., Soltanolkotabi, M., & Oymak, S. (2020). Gradient descent with early stopping is provably robust to label noise for overparameterized neural networks. In *International conference on artificial intelligence and statistics* (pp. 4313-4324). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.11680>.
12. Carass, A., Roy, S., Gherman, A., Reinhold, J. C., Jesson, A., Arbel, T., ... & Oguz, I. (2020). Evaluating white matter lesion segmentations with refined Sørensen-Dice analysis. *Scientific reports*, 10(1), 8242. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64803-w>

Received 04.12.2025.
Accepted 10.12.2025.

Applying machine learning techniques to analyze forest fire impacts on Sentinel-2 imagery across Ukraine

Abstract. Forest fires pose severe ecological and socio-economic threats and require timely, accurate mapping to support response and recovery. This study develops a machine-learning pipeline for detecting burnt forest areas across Ukraine from multispectral Sentinel-2 Level-2A imagery. Results demonstrate that a carefully designed CNN and targeted dataset enable reliable burnt-area mapping from widely available Sentinel-2 data, supporting regional monitoring and future generalization efforts.

Recent Studies and Publications Analysis. Remote sensing and deep learning have become central to burned-area mapping. Recent literature highlights the value of Sentinel-2 multispectral imagery for uni-temporal and multi-temporal burned-area mapping, the application of deep neural networks for semantic segmentation of high-resolution satellite images and architectural advances such as depthwise-separable convolutions (Xception) to

reduce parameters while preserving representational power. Reviews emphasize early detection, imbalanced classes, and the need for representative labeled datasets.

Research Objective. To develop and evaluate a machine-learning approach for accurate detection of burnt forest areas in Ukraine using multispectral Sentinel-2 imagery, producing a labelled dataset suitable for semantic segmentation and assessing model performance using robust metrics (IoU), with a case study on the Kinburn Peninsula

Main Body of Research. A manually annotated dataset was built from Sentinel-2 Level-2A scenes covering the Kinburn Peninsula (Mykolaiv region), selecting scenes with <1% cloud cover and capturing the October 4, 2022 fire event. The detection pipeline centers on a convolutional encoder–decoder semantic segmentation network. Models were implemented in PyTorch. Training used the Adam optimizer (learning rate = 0.001), a batch size of 16, and up to 50 epochs with early stopping (patience = 10) to avoid overfitting. Regularization via dropout (rate 0.5) and careful monitoring of validation loss were applied. Given the strong class imbalance typical of burnt-area mapping, overall accuracy was avoided; instead Intersection over Union (IoU, Jaccard Index) was used as the primary evaluation metric to provide reliable assessment of the burnt class detection performance. On the Kinburn test set (October 2022 scenes), the best performing configuration achieved an IoU of 95% for the burnt class.

Conclusions. This study demonstrates that a purpose-built machine-learning pipeline using Sentinel-2 multispectral imagery and an Xception-enhanced encoder–decoder CNN can accurately map burnt forest areas in Ukraine, achieving an IoU of 95% on the Kinburn Peninsula case study. The manual dataset produced for this work fills an important regional data gap, enabling robust semantic segmentation tailored to local wildfire characteristics. Future work should expand the dataset spatially and temporally, incorporate additional spectral bands and multitemporal sequences to improve resilience to smoke and phenological variability, and validate performance across diverse Ukrainian forest landscapes. Broader generalization and field validation will be critical steps toward operational regional fire-monitoring systems.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технології.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5304-4144>

Удовик Ірина Михайлівна – к.т.н., доцент, декан факультету інформаційних технологій Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка».
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

Крістіан Хайпке – д.т.н., професор, завідувач Інституту фотограмметрії та геоінформації Ганноверського Університету імені Лейбніца.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-9549>

Гнатушенко Максим Володимирович – студент, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка».
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3100-0628>

Hnatushenko Viktoriia – Doctor of engineering's sciences, Professor, Professor of Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5304-4144>

Udovyk Iryna – Candidate (PhD) of engineering's sciences, Associate Professor, Head of the Faculty of Information Technologies, Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

Heipke Christian - Dr.-Ing. habil., Professor, Head of Institute of Photogrammetry and GeoInformation of Leibniz University Hannover.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7007-9549>

Hnatushenko Maksym – student, Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3100-0628>

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, К.Л. Сергєєва, Д.М. Рой

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КАРТУВАННЯ ВОДНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ

Анотація. У роботі проведені дослідження з оцінки точності автоматизованого виділення поверхневих вод на основі спектральних водних індексів у поєднанні з методом порозування Оцу для території, що зазнали техногенної катастрофи після руйнування Каховської ГЕС. Використано оптичні супутникові знімки Sentinel-2 та оцінено точність маскування водних об'єктів, які мають гетерогенні властивості. Проаналізовано основні водні індекси з автоматичним визначенням оптимального порогу за методом Оцу. Встановлено, що MNDWI забезпечує найвищу точність визначення меж водних поверхонь для малих об'єктів зі складними неоднорідними контурами, тоді як AWEI демонструє високу чутливість до дрібних водойм. Отримані результати підтверджують доцільність поєднання спектральних індексів з автоматизованим порозуванням за методом Оцу для оперативного моніторингу водних об'єктів у динамічно трансформованих ландшафтах.

Ключові слова: водні ресурси, водні поверхні, водойми, автоматизоване картування, супутниковий моніторинг, методи ДЗЗ, геопросторові данні, спектральні індекси, метод Оцу, Sentinel-2.

Вступ. Водні ресурси є критично важливим елементом для забезпечення сталого розвитку країни, підтримання екологічної рівноваги та гарантування продовольчої безпеки. В умовах глобальних і регіональних змін спостерігається суттєве погіршення стану водних екосистем, що підкреслює необхідність їхнього постійного, системного та високоточного моніторингу. Одним із основних чинників цих змін є глобальне потепління, яке спричиняє підвищення середньорічних температур, збільшення частоти й інтенсивності посушливих періодів, зменшення річкового стоку та деградацію водноболотних угідь [1-4].

За даними Українського гідрометеорологічного інституту, протягом останніх трьох десятиліть середньорічна температура повітря в Україні зросла приблизно на 1,2 °С, що перевищує середні глобальні темпи потепління та є вищим за показники більшості регіонів Європи. Незважаючи на стабільність річної кількості опадів, підвищення потенційної випаровуваності призводить до зростання дефіциту вологи та погіршення водного балансу, що підсилює водний стрес на території країни [5].

Прогнозні кліматичні моделі свідчать про подальше зростання температури: очікується підвищення на 1,2–1,5 °С до 2050 року та на 2,9–3,3 °С до кінця XXI

століття залежно від сценаріїв викидів парникових газів [5]. Одночасно передбачається зміна просторово-часового розподілу опадів: їх збільшення у зимовий період та зменшення влітку й восени, особливо в південних та східних регіонах. Сукупність таких тенденцій – подовження теплого сезону, зростання частоти теплових хвиль, нерівномірний розподіл опадів та інтенсифікація випаровування – призводить до суттєвих змін гідрологічного режиму, поглиблення проблеми посух, зниження рівнів ґрунтових вод і деградації малих водойм.

Антропогенні фактори також сприяють погіршенню стану водних екосистем. Зокрема, активні військові дії, спричинені повномасштабним вторгненням росії на територію України, які супроводжуються руйнівними наслідками для інфраструктури, значно змінюють гідроморфологічні умови водних об'єктів. Прикладом є руйнування Каховської ГЕС, яке призвело до екологічної катастрофи та зміни гідрологічних параметрів Дніпровського каскаду, зумовивши втрату значних площ водного дзеркала, трансформацію берегової лінії та порушення структури прибережних екосистем.

У цих умовах зростає потреба у застосуванні високоточних методів картографування водних об'єктів, зокрема на основі даних дистанційного зондування Землі. Визначення точних просторових меж водних поверхонь є важливим етапом для ефективного управління водними ресурсами, оцінки ризиків, розроблення природоохоронних заходів і стратегій адаптації до змін клімату та техногенних впливів.

Постановка проблеми. Традиційні методи отримання даних про стан і конфігурацію водних об'єктів, зокрема геодезичні вимірювання та польові гідрологічні обстеження, характеризуються високою трудомісткістю, значними витратами та низкою обмежень в умовах важкодоступних територій. Крім того, під час активних бойових дій їх ефективність значно знижується через ризики для персоналу та фізичну недосяжність окремих ділянок, що ускладнює оперативне здійснення моніторингу.

Завдання ускладнюється в регіонах із трансформованими ландшафтами. Після техногенної катастрофи на Каховській ГЕС на території колишнього Каховського водосховища виник високо фрагментований водний ландшафт, представлений численними дрібними водоймами, які частково заросли молодими деревами, утворюючи густу рослинність. Крім того, річка Дніпро повернулася до свого історичного русла, що призвело до суттєвих змін у гідроморфологічних характеристиках території. Така просторово-структурна неоднорідність, що поєднує відкриті водойми, заболочені ділянки та заліснені території, значно ускладнює точну ідентифікацію водних поверхонь за спектральними ознаками.

У цьому контексті особливе значення набувають методи дистанційного зондування Землі, які дозволяють здійснювати регулярне, масштабне і безпечно отримання інформації про просторовий розподіл водних об'єктів. Однак точність автоматизованого вилучення водних поверхонь значною мірою залежить від специфіки вибраних спектральних індексів та алгоритмів порогування, що безпосередньо впливають на визначення меж водних об'єктів. За таких умов виникає необхідність у науково обґрунтованій оцінці точності результатів картографування, отриманих за допомогою водних спектральних індексів, у порівнянні з масками, сформованими шляхом автоматизова-

ного порогоування за методом Оцу [6, 7]. Це дозволить визначити точність, надійність і придатність таких методів для застосування в умовах високої гідрологічної та ландшафтної динаміки, що характерні для територій, змінених під впливом техногенних катастроф, на прикладі акваторії Каховського водосховища.

Мета дослідження полягає в оцінці точності автоматизованого виділення поверхневих вод на основі спектральних індексів із використанням методу порогоування Оцу для території Каховського водосховища. Дослідження спрямоване на визначення ефективності індексного підходу в умовах різко зміненого гідрологічного режиму після руйнування Каховської ГЕС та на встановлення оптимальних методів картування водних об'єктів у динамічно трансформованих ландшафтах.

Основна частина. Посилення антропогенного впливу, прискорення кліматичних змін та нерівномірний просторово-часовий розподіл опадів формують складні виклики для ефективного управління водними ресурсами України, особливо в регіонах, чутливих до дефіциту вологи. За цих умов зростає потреба в регулярному, високоточному й технологічно обґрунтованому моніторингу стану та площі поверхневих вод, що є основою збалансованого водокористування, підтримання гідрологічної рівноваги та планування адаптаційних заходів.

Традиційні польові методи – геодезичні зйомки та гідрологічні обстеження – хоча й забезпечують високий рівень просторової деталізації, залишаються трудомісткими, ресурсоемними та залежними від доступності місцевості. Їх застосування суттєво ускладнюється у віддалених і техногенно трансформованих районах, а також у зонах активних бойових дій. На цьому тлі оптичні супутникові дані Sentinel-2 відкривають можливість отримання систематичних, стандартизованих і просторово репрезентативних спостережень, що робить їх одним із ключових інструментів сучасного гідроекологічного супутникового моніторингу.

Ландшафт колишнього Каховського водосховища після руйнування Каховської ГЕС перетворився на складну просторову мозаїку, що поєднує оголені ділянки, мулові поверхні, заболочені масиви, молоді насадження й численні дрібні водойми. Така гетерогенність значно ускладнює автоматизоване спектральне виділення води, оскільки спектральні характеристики підстилаючої поверхні різко варіюють у межах коротких відстаней. Територія, трансформована внаслідок техногенної катастрофи, вирізняється високою спектральною неоднорідністю, що потребує ретельно підібраних інструментів для коректної ідентифікації водних поверхонь.

Спектральні водні індекси залишаються одним із базових інструментів дистанційного картографування водних об'єктів, адже дозволяють виокремлювати водні поверхні на основі відмінностей у їх спектральних характеристиках. Проте чутливість кожного індексу до взаємодії води з рослинністю, ґрунтами чи антропогенними об'єктами істотно впливає на кінцевий результат. Додатково ситуація ускладнюється в умовах тіней, змішаних пікселів і фрагментованої берегової лінії, що створює потребу у використанні індексів із підвищеною спектральною селективністю. Для цього широко застосовують спектральні індекси, які базуються на контрасті між відбивною здатністю

води, ґрунтів та рослинності [8-12]. Серед них Normalized Difference Water Index (NDWI) розраховується за формулою:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), \quad (1)$$

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру, Green – у зеленому. Ефективний для відкритих водних акваторій, проте чутливий до впливу рослинності та урбанізованих поверхонь.

Свій розвиток отримав Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), який забезпечує більш точне виділення водних об'єктів на супутникових знімках, ніж стандартний NDWI [10-12]. Індекс MNDWI розраховується за формулою:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR), \quad (2)$$

де SWIR - коефіцієнти відбиття у короткохвильовому інфрачервоному спектрі, Green – у зеленому.

Заміна NIR на SWIR підвищує точність виділення води в умовах фрагментованих і техногенно модифікованих ландшафтів.

Широкого застосування набув індекс автоматичного виділення води Automated Water Extraction Index (AWEI). AWEI дозволяє підвищити точність автоматичного виділення водних об'єктів на супутникових зображеннях, особливо в умовах тіней, урбанізованих територій та змішаних пікселів. AWEI описується такими формулами, адаптованими під різні типи поверхонь [8-12]. Для територій без тіней:

$$AWEI_{sh} = 4 * (Green - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR2), \quad (3)$$

Для ділянок із тінями:

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 * Green - 1.5 * (NIR + SWIR1) - 0.25 * SWIR2, \quad (4)$$

де NIR – коефіцієнти відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру; Green, Blue – у зеленому та синьому, відповідно; SWIR1, SWIR2 - коефіцієнти відбиття у короткохвильовому інфрачервоному спектрі.

AWEI демонструє стійкість до змішаних пікселів, рельєфної неоднорідності та умов, притаманних ландшафтам, зміненим техногенною катастрофою.

Для автоматизованого отримання масок поверхневих вод застосовано метод Оцу, що дозволяє автоматично визначати оптимальне порогове значення на основі мінімізації внутрішньокласової дисперсії між групами пікселів. Такий підхід усуває суб'єктивність ручного вибору порогів, що є критично важливим у спектрально неоднорідних середовищах, сформованих внаслідок техногенної трансформації території. Поєднання спектральних індексів із автоматизованим порогованням забезпечує можливість створення репрезентативних масок водної поверхні навіть у складних умовах

гідродинамічної неоднорідності, трансформованих внаслідок техногенних катастроф. На рисунку 1 наведено супутникове зображення Sentinel-2 за червень 2022 року – через два тижні після техногенної катастрофи – та за рік, у червні 2023 року.



Рисунок 1 – Супутникове зображення Sentinel-2:

- а) RGB-комполит за червень 2022 року;
- б) RGB-комполит за червень 2023 року

На супутникових зображеннях чітко відображається гідрологічна неоднорідність території Каховського водосховища, що виникла внаслідок техногенної катастрофи.

Порівняльний аналіз спектральних масок води, наведений на рисунку 2, сформованих на основі різних індексів, підтвердив суттєву залежність ефективності їх роботи від спектральної конфігурації каналів та особливостей просторової структури досліджуваної території. Отримані результати свідчать, що використання SWIR-діапазону (насамперед каналів SWIR1 та SWIR2 Sentinel-2) істотно підвищує контрастність між водними об'єктами та навколишніми поверхнями, що безпосередньо впливає на точність подальших індексних розрахунків.

Найбільш стабільну якість класифікації продемонстрував індекс MNDWI, який, завдяки залученню SWIR 1, забезпечує чітке відокремлення води навіть у випадку дрібних водойм, ділянок із низькою відбивною здатністю та локально затемнених зон. В умовах складної морфологічної структури — зокрема, тінювих фрагментів, уривчастих берегових ліній та ділянок із підвищеною неоднорідністю — найбільш ефективним виявився індекс AWEI_{sh}. Його здатність компенсувати вплив оптичних артефактів та зашумлених пікселів SWIR-діапазону дозволила мінімізувати хибнопозитивні результати класифікації. Індекс NDWI, побудований без використання SWIR-каналів, продемонстрував нижчу стійкість: спостерігалася тенденція до недооцінки площі водойм, частково перекритих рослинністю або змішаними типами поверхонь. Таким чином найменше значення площі води на дослідній ділянці Каховського водосховища, отримано для NDWI (15.88 км²), що зумовлено його схильністю недооцінювати водні об'єкти, особливо за наявності змішаних пікселів. Індеси MNDWI та AWEI (sh/nsh) показали значно більші площі — від 31.86 до 44.68 км², що відповідає їхній здатності ефективно придушувати фонові сигнали та виділяти водні маси навіть у складних умовах спостереження.

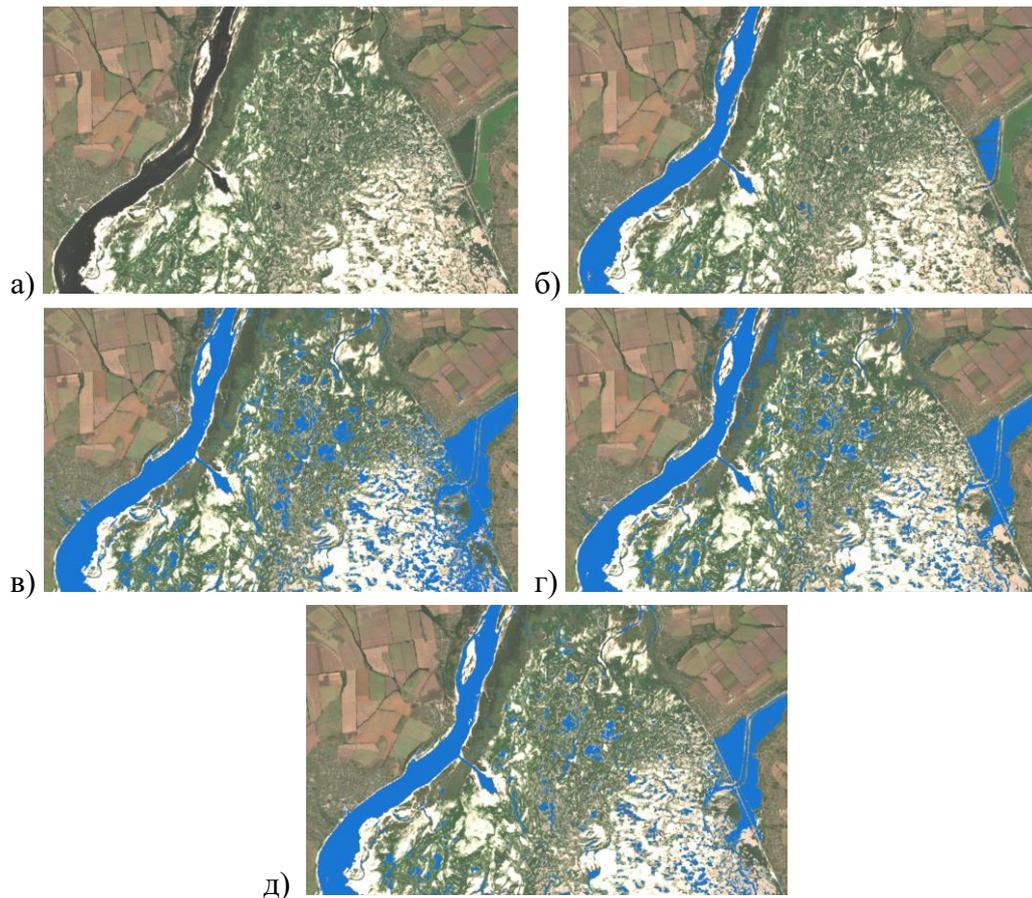


Рисунок 2 – Супутникове зображення Sentinel-2 за 20.06.2023 та отримана маска води за спектральними індексами із застосуванням автоматизованого порогоування за методом Оцу: а) RGB -компонент; б) маска води на основі NDWI_Оцу; в) маска води на основі AWEI_{sh}_Оцу; г) маска води на основі AWEI_h_Оцу; д) маска води на основі MNDWI_Оцу

Для оцінки точності отриманих масок на основі спектральних індексів з автоматизованим порогоуванням за методом Оцу проводилося обчислення за класичними метриками з використанням еталонної маски. Графічне представлення отриманих метрик наведено на рисунку 3.

Порівняння з еталонною маскою, побудованою на основі GSW та Sentinel-2 (27.35 км²), побудованою на основі GSW та Sentinel-2, показало, що MNDWI забезпечує найкращий баланс показників: Precision = 83.50%, Recall = 97.30%, F1 = 89.87%, Overall Accuracy = 97.61%, $\kappa = 0.885$. Особливу практичну цінність має потенціал комбінованих масок, сформованих на основі MNDWI та AWEI. Для територій, які зазнали техногенних катастроф, характерні сильна спектральна неоднорідність, наявність змішаних пікселів «вода–рослинність», «вода–мул», домішки техногенних матеріалів та осадів. В таких умовах застосування одного індексу може бути недостатньо стабільним. Поєднання високої повноти AWEI та здатності MNDWI ефективно придушувати міські та ґрунтові шуми може забезпечити точніше відтворення просторової структури водних поверхонь і покращити надійність класифікації.

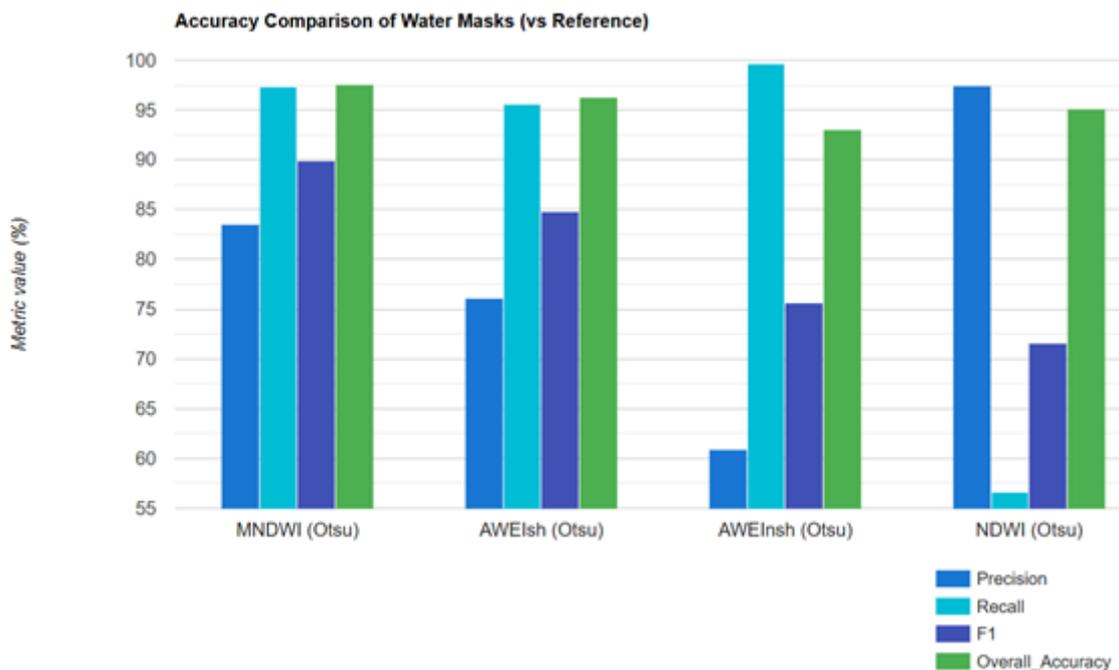


Рисунок 3 – Графічне представлення оцінки точності отриманих результатів

Висновки. Проведене дослідження продемонструвало, що спектральні індекси на основі оптичних даних Sentinel-2 у поєднанні з автоматизованим порогуванням за методом Оцу є ефективним інструментом для оперативного моніторингу та детекції поверхневих вод у спектрально неоднорідних умовах, характерних для територій, що зазнали техногенних катастроф. Порівняння водних індексів показало суттєві відмінності у їх здатності коректно відтворювати гідрологічну структуру, при цьому найвища узгодженість із еталоном спостерігалася для масок, отриманих на основі MNDWI. Індекси сімейства AWEI засвідчили високу чутливість до дрібних та слабо контрастних водних об'єктів, що робить їх корисними у складних техногенно трансформованих ландшафтах. NDWI, навпаки, продемонстрував обмеження у точності для зон зі змішаними або затемненими пікселями. Отримані результати вказують на доцільність використання комбінованих масок, побудованих на основі MNDWI та AWEI, що може забезпечити кращий баланс між повнотою та достовірністю. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку адаптивних методів інтеграції індексів, здатних підвищити якість супутникового моніторингу водних поверхонь у складних антропогенно змінених середовищах.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Biemans, H.; Haddeland, I.; Kabat, P.; Ludwig, F.; Hutjes, R.W.A.; Heinke, J.; von Bloh, W.; Gerten, D. Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resour. Res.* 2011, 47. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Haines-Young, R.; Potschin, M. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1; Technical Report; Fabis Consulting Ltd.: Nottingham, UK, 2018. [Google Scholar]
3. Grizzetti, B.; Lanza, D.; Lique, C.; Reynaud, A.; Cardoso, A. Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environ. Sci. Policy* 2016, 61, 194–203. [Google Scholar] [CrossRef]
4. Shaad, K.; Souter, N.J.; Vollmer, D.; Regan, H.M.; Bezerra, M.O. Integrating Ecosystem Services Into Water Resource Management: An Indicator-Based Approach. *Environ. Manag.* 2022, 69, 752–767. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
5. Аналітичні матеріали, наукові прогнози та пропозиції НААН щодо-до переліку заходів, реалізації яких сприятиме забезпеченню водної та продо-волчої безпеки України в умовах змін клімату URL: <http://naas.gov.ua/slide/v-umovakh-suchasnikh-zm-n-kl-matu-r-ven-zvolozhennya-na-teritor-ukra-ni-golovnim-chinnikom-yakiy-obm/#:~:text=%D0%92%D0%B6%D0%B5%20%D0%B2%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%87%D0%B0%D1%81%20%D0%BD%D0%B0,%E2%80%94%D0%B2%D1%96%D0%B4%20%20%D0%B4%D0%BE%20%25>. (дата звернення: 11.04.2025).
6. Condeça, J.; Nascimento, J.; Barreiras, N. Monitoring the storage volume of water reservoirs using Google Earth Engine. *Water Resour. Res.* 2022, 58, e2021WR030026. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Pekel, J.F.; Cottam, A.; Gorelick, N. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016, 540, 418–422. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Gao, H.; Birkett, C.; Lettenmaier, D.P. Global monitoring of large-reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resour. Res.* 2012, 48. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Khandelwal, A.; Karpatne, A.; Marlier, M.E.; Kim, J.; Lettenmaier, D.P.; Kumar, V. An approach for global monitoring of surface-water-extent variations in reservoirs using MODIS data. *Remote Sens. Environ.* 2017, 202, 113–128. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Ghansah, B.; Foster, T.; Higginbottom, T.P.; Adhikari, R.; Zwart, S.J. Monitoring spatial-temporal variations of surface areas of small reservoirs in Ghana. *Phys. Chem. Earth* 2022, 125, 103082. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Kavats, O., Khramov, D., & Sergieieva, K. (2022). Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water*, 14(24), 4030, DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244030>.
12. K Sergieieva, O Kavats, V Vasyliiev, Y Kavats, O Kovro, Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images. *CEUR Workshop Proceedings*, 2024, V3790, «Information Control Systems & Technologies 2024.», p. 422–434.

Received 03.12.2025.

Accepted 11.12.2025.

*Assessment of the accuracy of automated mapping methods
for water surfaces based on spectral indices*

The paper presents a comprehensive analysis of the effectiveness of Sentinel-2 spectral water indices in combination with automated thresholding using the Otsu method for mapping surface waters in areas affected by man-made disasters. The object of the study was the water area of the former Kakhovka Reservoir, whose landscape after the destruction of the Kakhovka HPP is characterized by pronounced spectral heterogeneity, the presence of mixed pixels, and a fragmented shoreline. Sentinel-2 optical images of medium spatial resolution were used for the analysis, which made it possible to assess the impact of spatial and structural heterogeneity of landscapes, including fragmented water bodies, wetlands, bare soil, and young vegetation. Four spectral indices – NDWI, MNDWI, AWEIsh, and AWEInsh – were used to evaluate water delineation effectiveness, followed by automatic determination of the optimal threshold using the Otsu method.

Comparison of the resulting masks with reference data showed that MNDWI provides the highest accuracy and overall consistency, while the AWEI indices exhibit increased sensitivity to small and low-contrast water bodies. NDWI demonstrated limitations under spectrally complex conditions, particularly in the presence of vegetation and turbid surfaces.

The obtained results emphasize the importance of using Sentinel-2 SWIR channels to increase the contrast of water features and confirm the feasibility of combining the MNDWI and AWEI indices. This approach improves the completeness and reliability of mapping in areas affected by man-made disasters. The study demonstrates the potential of automated satellite monitoring methods to support hydro-ecological management in complex anthropogenically modified environments. The proposed methodology can serve as a basis for further work on water mapping, water-use planning, and developing adaptation strategies for water-landscape transformations.

Keywords: water resources, water surfaces, reservoirs, automated mapping, satellite monitoring, remote sensing methods, geospatial data, spectral indices, Otsu method, Sentinel-2.

Кавац Олена Олександрівна - к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

Кавац Юрій Віталійович - к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0180-5957>

Сергеєва Катерина Леонідівна - к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-2209>

Рой Дмитро Миколайович - аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1281-8632>

Kavats Olena Oleksandrivna - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

Kavats Yurii Vitaliiovich - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0180-5957>

Sergieieva Kateryna - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Computer Engineering of Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-2209>

Roi Dmytro -graduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1281-8632>

ВПЛИВ СИСТЕМИ ФОКУСУВАННЯ НА ЧУТЛИВІСТЬ PIR ДАТЧИКУ

Анотація. В статті описано дослідження впливу систем фокусування (у тому числі вродженої) на чутливість PIR датчику. У технічній документації на PIR датчики недостатньо інформації про вимоги до системи фокусування та про можливість використання датчика без неї.

Пасивні інфрачервоні датчики руху (далі PIR датчики) є найважливішими компонентами сучасних систем безпеки та автоматизації. Ці датчики призначені для виявлення присутності нагрітих тіл шляхом виявлення інфрачервоного випромінювання, випромінюваного їх тілами.

Ключові слова: PIR датчик, D203S, ІЧ датчик руху.

Вступ. Пасивні інфрачервоні датчики руху (далі PIR датчики) є найважливішими компонентами сучасних систем безпеки та автоматизації. Ці датчики призначені для виявлення присутності нагрітих тіл шляхом виявлення інфрачервоного випромінювання, випромінюваного їх тілами.

У технічній документації на PIR датчики не має опису, як він працює без фокусувальної лінзи, чи взагалі може працювати без неї. Тому задача дослідження впливу системи фокусування на чутливість PIR датчику є актуальною. В цій статті описано дослідження особливостей використання PIR датчику руху зі штатною лінзою, без лінзи взагалі, та зі звичайною оптичною фокусувальною лінзою.

Матеріали та методи. PIR датчик (рис. 1) – це електронний компонент, що широко використовується для виявлення руху. Він здатний уловлювати зміни інфрачервоного випромінювання (тобто тепла) від тіла людини, тварин чи інших джерел тепла. Його часто називають інфрачервоним датчиком руху або PIR детектором.

Оскільки він сам по собі не випромінює жодних сигналів, а лише пасивно приймає та вимірює інфрачервоне випромінювання у навколишньому середовищі, його також називають «пасивним» датчиком. Порівняно з активними інфрачервоними датчиками (які повинні випромінювати інфрачервоне світло та виявляти відображення для виявлення об'єктів), PIR датчики руху повинні лише реєструвати зміни природного тепла та не надсилати жодних сигналів. Це не тільки робить PIR датчик більш енергоефективним, але також знижує кількість помилкових спрацьовувань, викликаних відображенням світла або змінами навколишнього середовища. Крім того, PIR датчики мають безліч інших переваг.

щено віконцем, виготовленим з матеріалу, що пропускає ІЧ-випромінювання (зазвичай це кремнієвий матеріал з покриттям). За віконцем розташовані два збалансовані датчики (рис. 3).



Рисунок 2 – PIR сенсор D203S

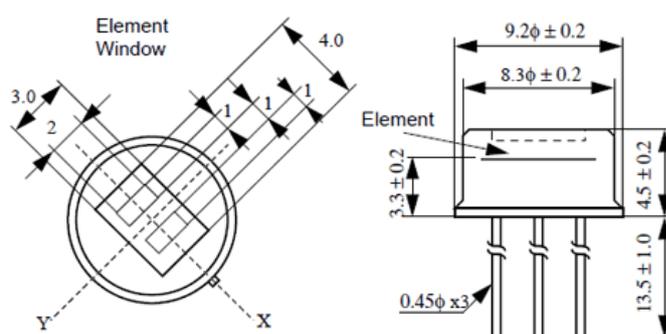


Рисунок 3 – Розташування двох збалансованих датчиків у PIR сенсорі D203S

На (рис. 3) представлено креслення, що показує вікно сенсора з двома елемента з чутливого матеріалу [1].

На (рис. 4) зображено внутрішню схему. Важливою інтегрованою частиною сенсора є JFET [3], який забезпечує дуже низький рівень шуму та буферизує надзвичайно високий імпеданс датчиків, перетворюючи його на сигнал, який може відчувати чіп оброблення сигналу (наприклад, BIS0001 [2]).

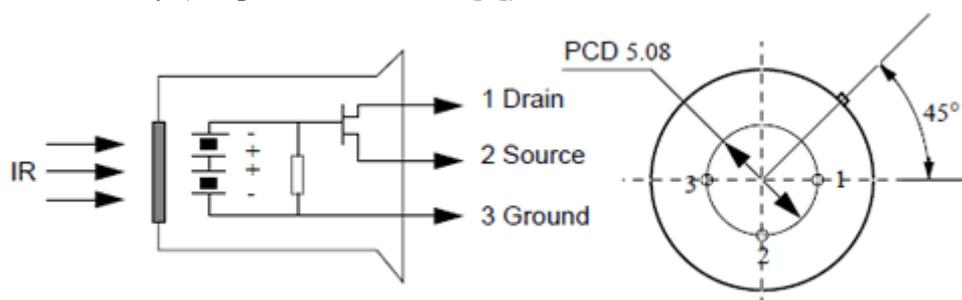


Рисунок 4 – PIR сенсор RE200B, внутрішня схема

PIR-сенсори досить універсальні та здебільшого відрізняються лише ціною та чутливістю. Більшість справжньої «магії» відбувається з оптикою. Це досить гарна ідея для виробництва: PIR-сенсор та схема є фіксованими та коштують кілька доларів. Лінза коштує лише кілька центів і може дуже легко змінювати ширину, діапазон, діаграму дії. На (рис. 1) лінза — це просто шматок пластику, але це не означає, що зона виявлення — це лише два прямокутники. Зазвичай ми хочемо мати зону виявлення набагато більшу. Для цього ми використовуємо просту лінзу, таку як ті, що використовуються в камері: вона стискає велику площу (наприклад, пейзаж) у малу (на плівці або CCD-сенсорі). У PIR- датчиків частіше за все використовують лінзи Френеля (рис. 5).

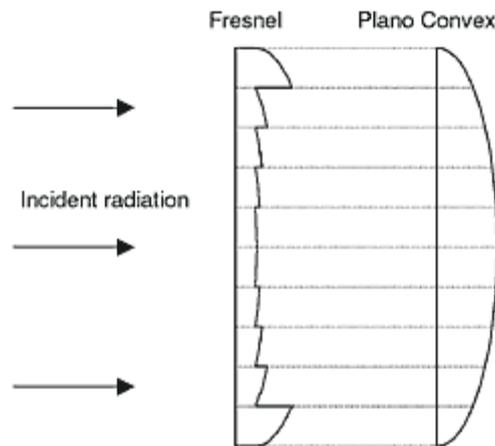


Рисунок 5 – Лінза Френзеля

Лінза Френеля концентрує світло, забезпечуючи ширший діапазон інфрачервоного випромінювання для датчика (рис. 5).

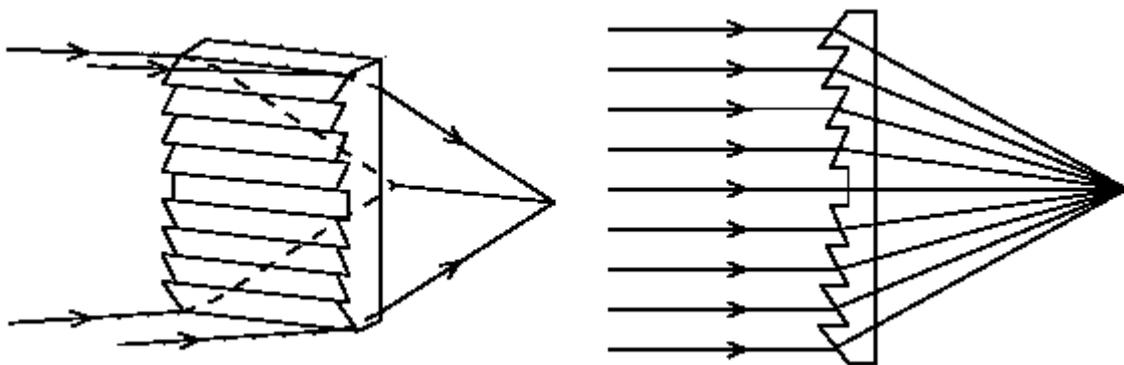


Рисунок 6 – Робота лінзи Френзеля

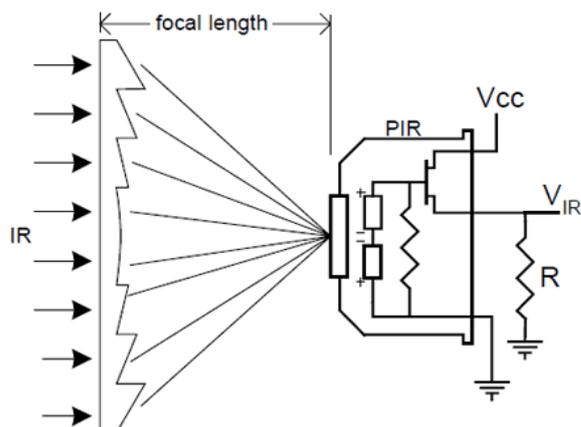


Рисунок 7 – Поєднена лінзи Френзеля з PIR сенсором RE200B

За рахунок лінзи Френеля, тепер у нас набагато більший діапазон. Однак насправді у нас два сенсори, і, що ще важливіше, нам не потрібні два справді великі прямокутники області сприйняття, а радше розкидані кілька маленьких областей. Тож лінзу розділено на кілька секцій, кожна з яких є лінзою Френеля (рис. 7).

Різні фасети та підлінзи (рис. 8). створюють діапазон зон виявлення, що чергуються одна з одною. Також центри лінз у гранях вище «невідповідні» – кожна інша вказує на різні половини сенсорного елемента PIR.

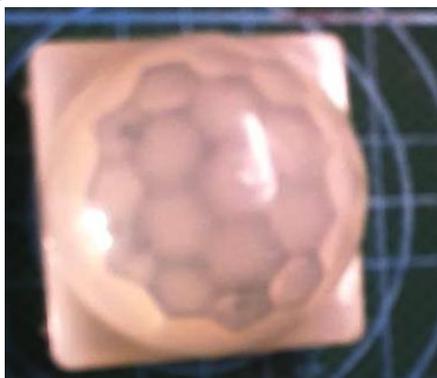


Рисунок 8 - Фасети та підлінзи

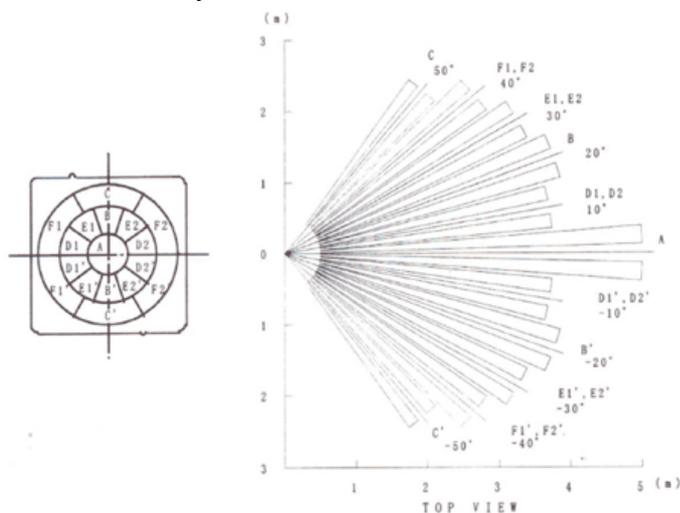


Рисунок 9 – Діаграма направленості зон спрацювання 2 сенсорів в середині датчику

Методика експерименту. Було проведено дослідження можливості використання датчику без лінзи та зі звичайною скляною лінзою. Датчик в цьому досліді закріплювався на штативі (рис. 10). Для отримання результатів сигнал одночасно було подано на DDM мультиметр SDM3055 та цифровий осцилограф SDS814X-HD. Так як діапазон сигналу був відносно невеликий – від одиниць до десятків мілівольт, а інтервал стеження досягав десятків секунд, то використання мультиметру було більш доцільним, і у подальшому наведено дані, що були отримані з мультиметру.

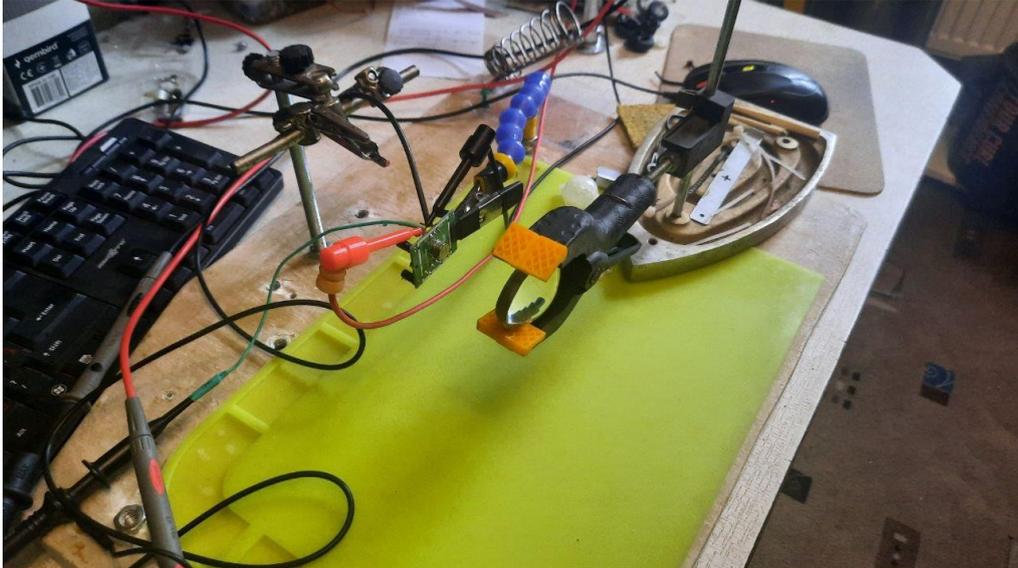


Рисунок 10 – Частина стенду для дослідження ІЧ датчику, яка отримує сигнал

В якості об'єкта, на який спрацьовує датчик руху було використано пластикову пляшку з водою температурою приблизно 340 К. Для відтворення однотипної динаміки в обмеженому простоті було створено маятник в ефективною довжиною 2.36 м. Відстань від сенсора до маятника складала 1.4 метра, а амплітуда сягала 0.4 м. Характерний час затухання коливань був значно більшим, ніж час вимірювання, завдяки достатньої добротності системи. У той же час слід відмітити, що у наявних умовах неможливо уникнути неконтрольованих інфрачервоних впливів, що відображається у вигляді імпульсних завад на графіках.

Аналіз результатів. Дослід показав, що без лінзи перед сенсором, в останнього вкрай низька чутливість. Без лінзи сигнал на виході в 10 разів слабший по амплітуді. Коли ж використовувалась скляна лінза сигнал зовсім зник з виходу сенсора. Це пов'язано з тим, що звичайне скло не пропускає інфрачервоне випромінювання відповідного діапазону.

З іншого боку, при використанні сенсора без лінзи реакція на предмети, що були розташовані у близької зоні, була більшою.

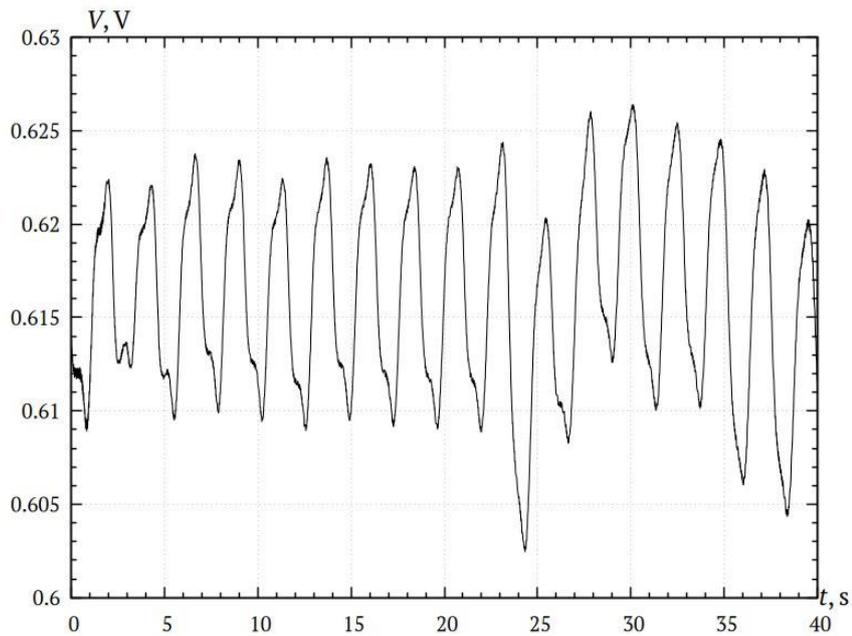


Рисунок 11 – Аналоговий сигнал на виході сенсора D203S з штатною пластиковою лінзою Френеля

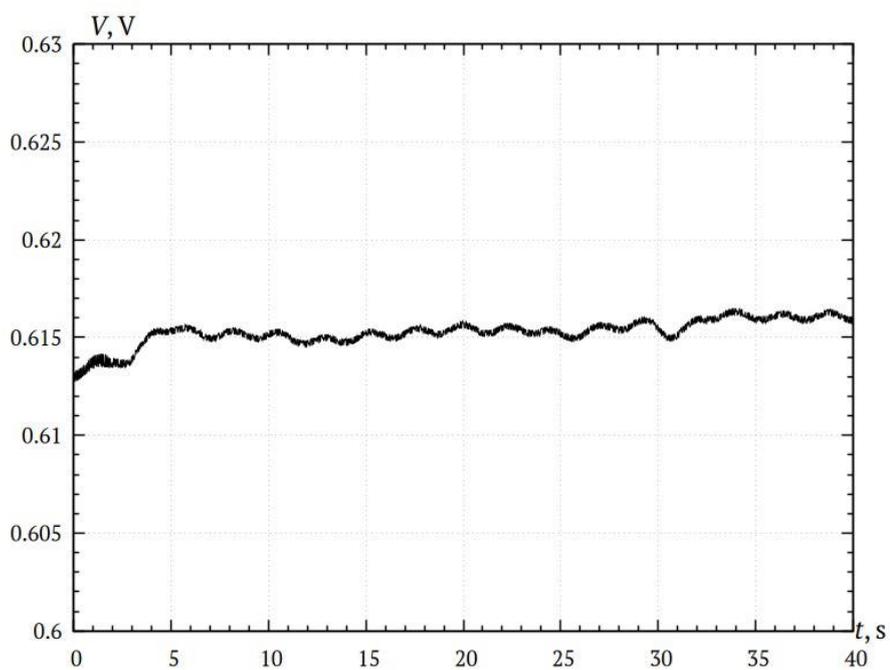


Рисунок 12 – Аналоговий сигнал на виході сенсора D203 без лінзи

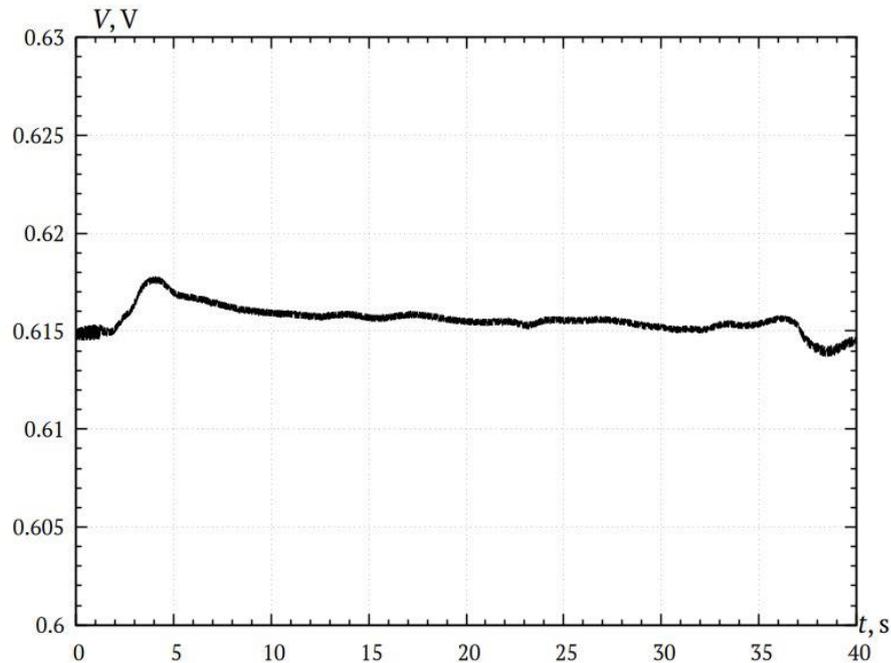


Рисунок 13 – Аналоговий сигнал на виході сенсора D203S з скляною лінзою ($F = 50 \text{ mm}$)

Висновки. Виходячи як з апріорних відомостей, так і з даних, отриманих у результаті експериментів, можна зробити наступні висновки:

1. Конструкція та матеріали PIR-сенсорів, що було досліджено, дозволяють успішно детектувати переміщення тіл, температура яких відрізняється від середньої, що оточує, на десятки градусів.

2. Без використання лінзи Френеля можлива детекція теплих об'єктів можлива лише у ближньої зоні. З використанням відповідної лінзи зона детекції значно поширюється.

3. Використання звичайних лінз оптичного діапазону для успішної роботи з цими сенсорами практично неможливо.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. All-Purpose Dual Element Pyroelectric Infrared Radial Sensor datasheet. Shenzhen senban optical & electronic CO., LTD., 2010. URL: https://www.skytech.ir/Download/File/9197_D203S.pdf.
2. BISS0001 GENERAL DESCRIPTION datasheet. BISS0001 PIR CONTROLLER Silvan Chip Electronics Tech.Co., Ltd 2012. URL: <http://www.sc-tech.cn/en/BISS0001.pdf>.
3. Development of a JFET model with increased accuracy: measurements of wrangling data, acquisition and model analysis. Viktoriia Hnatushenko, Anton Guda, Andrew Zimoglyad, Anna Zhurba. Proceedings of the Computational Intelligence Application Workshop (CIAW 2025). Lviv, Ukraine, September 26-27, 2025. pages 97-109. ISSN 1613-0073.

Received 10.12.2025.
Accepted 15.12.2025.

The influence of the focusing system on the sensitivity of the PIR sensor

Passive infrared motion sensors (hereinafter referred to as PIR sensors) are the most important components of modern security and automation systems. These sensors are designed to detect the presence of people by detecting infrared radiation emitted by their bodies. The technical documentation for PIR sensors does not describe how it works without a focusing lens, or if it can work without one at all. This article describes the study of the possibility of using a PIR motion sensor without a lens.

A study was conducted on the possibility of using a sensor without a lens and with a conventional glass lens. The experiment showed that without a lens in front of the sensor, the latter has extremely low sensitivity. Without a lens, the output signal is 10 times weaker in amplitude. When a glass lens was used, the signal completely disappeared from the sensor output. This is due to the fact that conventional glass does not transmit infrared radiation of the corresponding range. On the other hand, when using a sensor without a lens, the reaction to objects located in the near zone was greater. Based on both a priori information and the data obtained as a result of experiments, the following conclusions can be drawn:

1. The design and materials of the PIR sensors that were studied allow for the successful detection of the movement of bodies whose temperature differs from the surrounding environment by tens of degrees.

2. Without the use of a Fresnel lens, detection of warm objects is possible only in the near zone. With the use of an appropriate lens, the detection zone is significantly expanded.

3. Using conventional optical range lenses to successfully work with these sensors is practically impossible.

Key words: PIR sensor, D203S.

Зимогляд Андрій Юрійович - к.т.н., доцент кафедри ІТС Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

Гуда Антон Ігорович - д.т.н., професор кафедри ІТС Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

Виродов Олександр Сергійович - магістр кафедри ІТС Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3814-4461>

Zymoghlyad Andriy Yuriyovych - Ph.D., ass.professor of the department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

Guda Anton Igorovich - Ph.D., professor of the department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

Vyrodov Oleksandr Serhiyovych - Master's Student of the Department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3814-4461>

МЕТОД РЕЗОНАНСНИХ ЗАПИТІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ КОНФЛІКТІВ У МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Анотація. У статті запропоновано метод резонансних запитів для вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників. Метод резонансних запитів базується на принципах самоорганізації, використовує модель частотної та параметричної синхронізації між агентом-ініціатором запиту й агентами-виконавцями, що дозволяє замінити ресурсомісткі переговори на миттєву селективну реакцію. Результати дослідження свідчать, що застосування розробленого методу дозволяє знизити комунікаційне навантаження порівняно з класичними методами та забезпечує стабільну роботу системи в умовах пікового завантаження, скорочуючи час прийняття рішень.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, мультиагентні системи, цифрові двійники, вирішення конфліктів, метод резонансних запитів.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується глибинною трансформацією підходів до управління складними системами різного роду діяльності. Парадигма Індустрії 4.0, а також її подальша еволюція в концепцію Індустрії 5.0, підвищує актуальність питання створення високоадаптивних, самокерованих виробничих та логістичних середовищ. Ключовим інструментом реалізації таких середовищ стає технологія цифрових двійників (Digital Twins, DT) – віртуальних аналогів фізичних об'єктів, процесів або систем, які перебувають у постійній інформаційній взаємодії з оригіналом [1-2]. Варто наголосити, що ізольоване існування цифрових двійників не дозволяє реалізувати повний потенціал технології. Справжня цінність цифровізації виникає при їх об'єднанні у складні екосистеми, де двійники складових (верстатів, транспортних роботів, деталей, персоналу, енергетичних мереж тощо) взаємодіють між собою для досягнення спільних виробничих цілей. За умови достатнього рівня незалежності між об'єктами у системі, архітектуру її цифрового двійника доцільно описувати за допомогою мультиагентних систем (Multi-Agent Systems, MAS), де кожна сутність наділяється властивостями інтелектуального агента: автономністю, соціальністю, реактивністю та проактивністю.

Для подібних складних систем надзвичайно важливим є питання комунікації та вирішення конфліктів, які неминуче виникають у єдиному інформаційному та фізичному просторі зі зростанням кількості агентів, їх деталізації та щільності. Конфлікти можуть мати різну природу: від конкуренції за спільні неподільні ресурси (наприклад, до-

ступ до єдиного зарядного терміналу для групи мобільних роботів) до просторових колізій (перетин траєкторій руху) та інформаційних розбіжностей (суперечливі дані про стан середовища). Ефективність функціонування всієї системи безпосередньо залежить від швидкості та якості вирішення цих конфліктів у мережі цифрового двійника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [4] показує, що традиційні підходи до координації в мультиагентній системі, такі як централізоване планування, стають «вузьким місцем» через високу обчислювальну складність та вразливість до відмов центрального вузла. Аналіз [5] світчить про те, що децентралізовані методи, зокрема класичний протокол контрактної мережі (Contract Net Protocol, CNP) та різноманітні аукціонні алгоритми, забезпечують гнучкість та стійкість. Проте дослідження [4,6] показують, що ці методи часто страждають від проблеми «комунікаційного вибуху», що відбувається при лавиноподібному зростанні трафіку всередині цифрового двійника при збільшенні кількості агентів, що призводить до неприпустимих затримок.

Проаналізуємо детальніше найбільш розповсюджені та ефективні методи координації у мультиагентних системах для кращого розуміння їхніх переваг та недоліків. Протокол контрактної мережі (CNP) та його модифікації розглядаються як стандарт для мультиагентних систем цифрових двійників [7]. В його основі лежить імітація процедури тендеру: менеджер оголошує завдання, агенти надсилають пропозиції, менеджер обирає найкращу. Незважаючи на свою універсальність, CNP має суттєві недоліки. По-перше, у великих системах широкомовна розсилка запитів (Task Announcement) створює надмірний трафік [8]. Якщо в мережі 1000 агентів і кожен надсилає пропозицію, менеджер повинен обробити 1000 повідомлень за короткий час. Варто також згадати і про якість рішень методу: класичний CNP є «жадібним» алгоритмом і не гарантує глобальної оптимальності. Найбільший недолік для застосування методу при проєктуванні цифрових двійників складних систем полягає у тому, що через велику кількість повідомлень, які потрібно обробити, поки триває процедура тендеру, стан середовища може змінитися, роблячи обране рішення неактуальним [9], що вкрай негативно впливає на оптимальність подальших дій. Сучасні дослідження пропонують модифікації, наприклад, введення соціальних норм або використання мурашиних алгоритмів для оптимізації маршрутизації повідомлень, проте ці надбудови часто збільшують обчислювальну складність самого агента [10].

Механізми аукціонів та переговорів є ефективним інструментом для задач розподілу ресурсів, оскільки дозволяють максимізувати корисність системи. Однак, як зазначається в дослідженнях [11-12], аукціони вразливі до маніпуляцій і вимагають складних стратегій поведінки агентів. У контексті цифрових двійників промислового обладнання, де агенти часто є кооперативними (спільна власність підприємства), конкурентна природа аукціонів може бути надлишковою та неефективною. Крім того, ітеративні аукціони створюють значні затримки, що неприпустимо для аварійних ситуацій.

Мета дослідження. Основною метою цієї роботи є розроблення методу вирішення конфліктів у мультиагентній системі цифрових двійників складних систем, який забезпечуватиме децентралізацію, масштабованість та низьке комунікаційне навантаження. Окрім того, необхідною частиною роботи є дослідження розробленого методу та його порівняння з відомими підходами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для забезпечення децентралізації під час вирішення конфліктів та комунікації у цій роботі пропонується перейти від «торгів» між агентами до «узгодження» між ними на основі подібності станів. Отже, кожен агент матиме реалізований комунікаційний рівень, що відповідатиме за створення, керування та реакцію на задачі чи конфлікти у системі.

Створення нового методу ґрунтується на використанні поняття «резонансу» – вибіркового підсилення реакції при збігу параметрів початкового впливу. Якщо розглядати це поняття у фізиці, то резонанс дозволяє передавати енергію з максимальною ефективністю. В інформаційних системах аналогом енергії є інформація та обчислювальний ресурс. Відповідно агент-ініціатор посилає початковий запит (хвилю) у мережу, а потім обробляє лише ті запити, які «резонують» (збігаються) з його поточним станом. Цей підхід перегукується з концепціями шаблону «Publish/Subscribe» та семантичної маршрутизації, але додає динамічний компонент: ступінь відповідності (амплітуда резонансу) змінюється в часі залежно від стану агента-двійника.

Розглянемо детальніше реалізацію механізмів комунікації в методі резонансних запитів. Нехай у системі цифрового двійника складної системи існує множина агентів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Кожен агент a_i у момент часу t описується вектором стану $S_i(t)$ у багатовимірному просторі ознак \mathbb{S} :

$$S_i(t) = \langle p_i(t), c_i(t), g_i(t) \rangle, \quad (1)$$

де $p_i(t) \in R^{n_p}$ – вектор фізичних параметрів (координати, швидкість, рівень енергії, температура, вібрація), що отримується з сенсорів фізичного об'єкта;

$c_i(t) \in R^{n_c}$ – вектор компетенцій та ресурсів (тип обладнання, доступні інструменти, ліцензії, вільна пам'ять);

$g_i(t) \in R^{n_g}$ – вектор цілей та зобов'язань (поточне завдання, черга, пріоритет).

Стан кожного агента може бути розширений більшим набором ознак, що може частково вплинути на час обчислень, проте завжди залишається на розгляд проєктувальника системи. Також кожен агент має індивідуальний набір характеристик, що може повністю або частково сходиться чи не сходиться із набором характеристик інших агентів.

Відповідно у певний момент, коли агент-ініціатор потребує комунікації з іншими агентами для вирішення конфлікту чи певної задачі, він створює резонансний запит Q_j , що задається наступним вектором:

$$Q_j = \langle Y_j, \rho, \tau, \varepsilon \rangle, \quad (2)$$

де $Y_j \in \mathcal{S}$ – вектор вимог до виконавця, описується вектором стану агента;

ρ_j – пріоритет запиту;

τ_j – час життя запиту (Time to live, TTL);

ε_j – поріг активації резонансу, мінімальне оцінка відповідності вектору вимог.

У свою чергу агенти-виконавці отримують резонансні запити та обчислюють силу резонансу, ступінь відповідності запиту. Функція резонансу $R(S_i, Y_j)$ визначає ступінь відповідності агента a_i запиту Q_j . Ця функція є визначальним фактором для коректної роботи методу та може визначатись індивідуально проектувальником системи з огляду на наявні фактори. Для прикладу, функція резонансу може бути визначена як зважена косинусна подібність з урахуванням обмежувальних факторів, якщо вектори станів мають однакову розмірність:

$$R_i(S_i, Y_j) = \rho_j \cdot \cos(S_i, Y_j) \cdot \prod_k H(c_{i,k} - c_{j,k}), \quad (3)$$

де $H(x)$ – функція Хевісайда, що забезпечує виконання жорстких обмежень запиту, наприклад, наявність конкретного інструменту.

У свою чергу обчислення значення косинусної подібності забезпечуватиме пошук найбільш підходящого агента (з найбільшою кількістю потрібних ресурсів) серед всіх тих, що пройшли задані обмеження. Значення пріоритету буде пропорційно масштабувати обчислене значення для пришвидшення обробки високопріоритетних запитів.

Після обчислення значення резонансу формується відповідь агента-виконавця. На відміну від бінарної логіки (годиться / не годиться), метод резонансних запитів вводить імовірнісну та часову залежність реакції від сили резонансу. Час затримки відповіді t_{resp} для агента a_i визначається обернено пропорційно до величини резонансу:

$$t_{resp}(i) = T_{base} \cdot e^{-\lambda(R_i - \varepsilon_j)}, \quad (4)$$

де T_{base} – базовий часовий інтервал, а λ – коефіцієнт чутливості, за допомогою якого можна регулювати, наскільки сильно зменшується час відповіді при збільшенні значення резонансу R_i . Така залежність гарантує, що агент з найвищим рівнем відповідності («найсильнішим резонансом») відповідь першим. Це дозволяє ініціатору прийняти першу ж валідну відповідь (First-come, Best-fit), значно скорочуючи час очікування порівняно зі збором усіх пропозицій у CNP. Також можливим є варіант, коли агенту-ініціатору у певному проміжку часу потрібно зібрати усі відповіді від агентів-виконавців та оцінити їх, що частково збільшить шанс обрання найоптимальнішого варіанта серед можливих.

Окремо варто уточнити процес обробки складних конфліктів у системі. Якщо відбулась ситуація, за якої два агенти конкурують за певний ресурс, наприклад, дві машини зустрілися у вузькому коридорі, то пріоритет отримає той, хто виконує завдання (запит) із вищим пріоритетом. Агент з нижчим пріоритетом отримує «наказ» поступитися

та очікує своєї черги. Якщо пріоритети рівні, використовуються внутрішні механізми пріоритетів системи або випадкові значення для перерахунку значень резонансу.

Отже, процес комунікації задля вирішення конфлікту чи розподілу завдань проходить наступні фази.

1. *Надсилання (Emission)*. Агент-ініціатор виявляє конфлікт (наприклад, прогнозується вихід з ладу підшипника). Далі агент формує вектор вимог (потрібен ремонтний робот з інструментом X) та надсилає відповідний запит у мережу агентів.

2. *Поглинання та резонанс (Absorption & Resonance)*. Потенційні агенти-виконавці отримують повідомлення та обчислюють значення резонансу (відповідності запиту). Якщо агент не відповідає умовам або відповідність нижча за мінімальне значення, то подальша обробка зупиняється, що дозволяє знизити трафік.

3. *Тимчасова модуляція (Temporal Modulation)*. Агенти, що відповідають умовам запиту, обчислюють значення затримки та встановлюють таймер для надсилання відповіді. Якщо поточний агент отримує повідомлення, що інший агент уже обробляє запит до закінчення таймера, він скасовує свою відправку (відбувається пригнічення відгуку).

4. *Відгук та фіксація (Response & Commitment)*. Таймер агента з найвищим резонансом спрацьовує першим і він надсилає повідомлення агенту-ініціатору з пропозицією виконати запит. Ініціатор, отримавши першу (або перші K) пропозицій, оцінює їх і надсилає підтвердження та сигнал відміни для інших.

Відповідно отримуємо наступну діаграму послідовностей (рис. 1) для виконання резонансного запиту для двох агентів для випадку, коли один із них відповідає вимогам, а інший – ні.

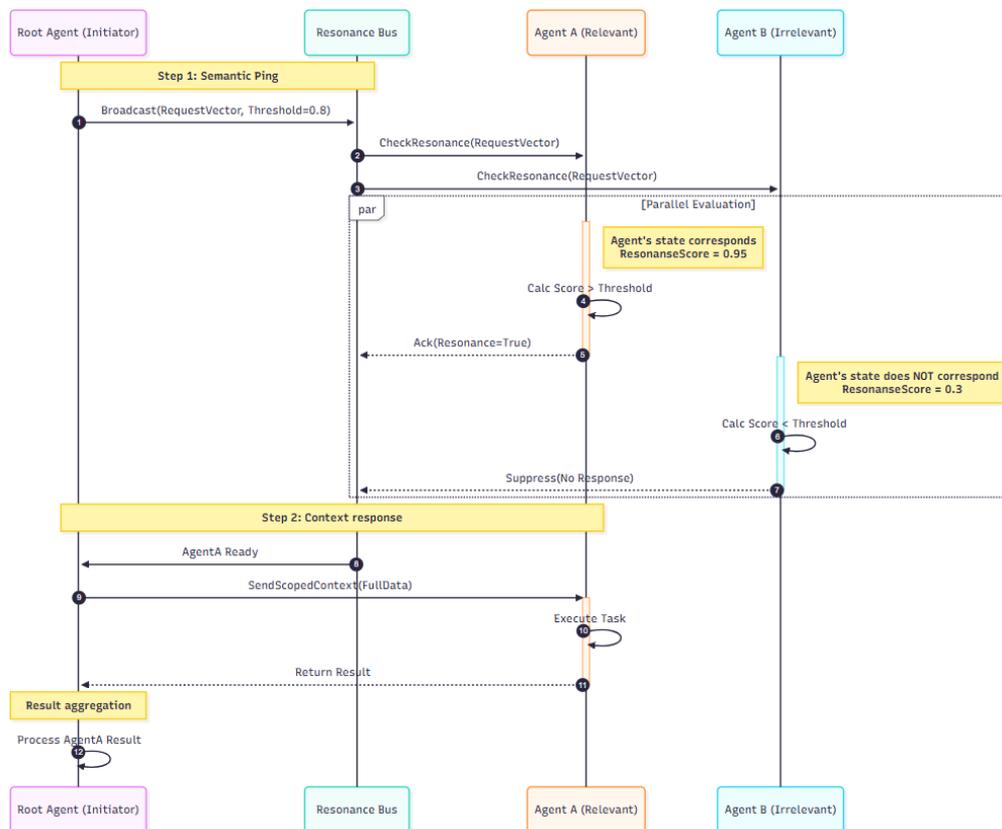


Рисунок 1 - Діаграма послідовностей для прикладу виконання резонансного запиту
 ISSN 1562-9945 (Print)
 ISSN 2707-7977 (Online)

Для реалізації методу структура агента у системі цифрового двійника має бути розширена спеціалізованими модулями. Стандартна BDI-архітектура (Belief-Desire-Intention) доповнюється «Резонансним шаром» (Resonance Layer), який працює на нижчому рівні абстракції, ближче до мережевого інтерфейсу. Компонент, що відповідає за резонансні запити, включає наступні модулі.

1. *Модуль сприйняття (Perception Module)*, який отримує дані від IoT-сенсорів фізичного двійника.

2. *Генератор профілю (Profile Generator)*, що динамічно оновлює вектор стану агента.

3. *Компаратор резонансу (Resonance Comparator)*, який виконує швидке обчислення функції R . Це модуль є математичним ядром методу та має бути оптимізованим для векторних операцій.

4. *Контролер комунікації (Communication Controller)*, що керує відправкою повідомлень з урахуванням розрахованої затримки.

Відповідно отримуємо наступну діаграму компонентів агента (рис. 2).

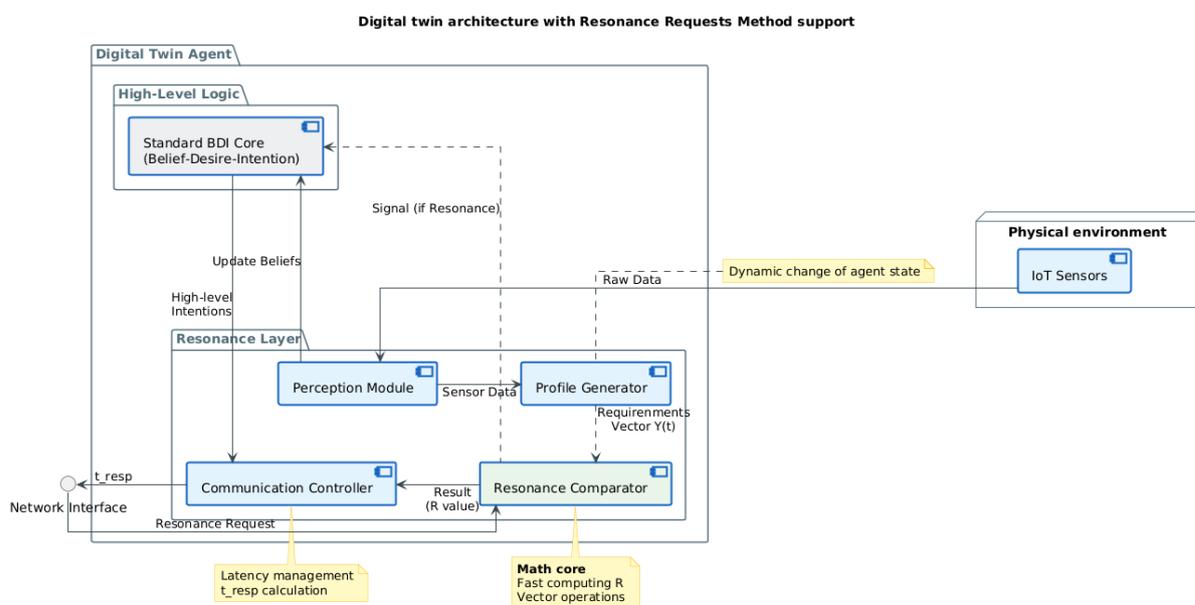


Рисунок 2 - Діаграма компонентів агента цифрового двійника з підтримкою резонансних запитів

Аналіз отриманих результатів. Для дослідження розробленого методу було реалізоване програмне забезпечення для імітаційного моделювання за допомогою мови програмування Python. Для виконання дискретно-подієвого моделювання була використана бібліотека SimPy. З огляду на пришвидшення роботи методу для математичних обчислень були застосовані чисельні методи бібліотеки NumPy.

Для моделювання було обрано сценарій переміщення роботів по складу розміром 50 на 50. Перед агентами стояло завдання виконати випадкові заявки на переміщення, враховуючи наступні обмеження: вузькі проходи (можливість блокування), обмежений заряд батарей, обмежена кількість зарядних станцій (5 одиниць). Для кращої демон-

страції на великих системах кількість агентів змінювалась від 20 до 200, а також змінювалась кількість завдань на переміщення. Для кожного набору агентів моделювання відбувалось у системах, де застосовано різні методи комунікації (вирішення конфліктів): розроблений метод резонансних запитів, механізм переговорів, де відбувається пошук глобального оптимального рішення, та протокол контрактної мережі (CNP), при якому запит-відповідь йде від кожного агента.

Для порівняння були обрані наступні показники (метрики) ефективності:

1. T_{res} – середній час узгодження(від появи запиту до укладання контракту);
2. N_{msg} – сумарна кількість повідомлень у мережі на одне завдання;
3. R_{succ} – відсоток успішно виконаних завдань (тайм-аутів);
4. O_{gap} – відхилення(у %) знайденого рішення від теоретично оптимального.

Проаналізуємо результати по кожній з метрик. Отримані результати, а саме, середній час узгодження T_{res} (табл. 1) демонструють, що механізм переговорів є найповільнішим через складні ітеративні процедури торгів для досягнення глобального оптимуму, що стає критичним при $N = 200$.

Таблиця 1

Середній час узгодження T_{res} , мс

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	125	214	38
50	293	547	45
100	648	1152	58
200	1451	3813	82

CNP показує лінійне зростання затримок $O(n)$, оскільки менеджер змушений обробляти пропозиції від усіх вільних агентів. Натомість метод резонансних запитів демонструє найвищу стабільність. Час реакції зростає незначно (з 38 до 82 мс) навіть при збільшенні кількості агентів у 10 разів. Така поведінка легко пояснюється тим, що агент-ініціатор не чекає відповідей від усіх, а лише від першого агента-виконавця, що зрезонував (відповідав усім вимогам) та мав найкращу оцінку відповідності. Отже, запропонований метод має складність $O(k)$, при чому $k \ll n$.

Таблиця 2

Сумарна кількість повідомлень N_{msg}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	42	68	5.4
50	107	165	6.2
100	239	341	7.1
200	416	725	8.5

Отримані значення сумарної кількості повідомлень N_{msg} (табл. 2) демонструють, що метод резонансних запитів справді забезпечує зниження трафіку на понад 90% порівняно з CNP, оскільки повідомлення пропозиції надсилають лише агенти з високим рівнем, тоді як у CNP відповідають майже всі вільні агенти.

Під час очислення відсотка успішно виконаних завдань R_{succ} , завдання вважалось проваленим, якщо агент-виконавець не був знайдений за допустимий час (виник тайм-аут).

Таблиця 3

Відсоток успішно виконаних завдань R_{succ}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	99.5%	99.9%	99.2%
50	98.2%	99.5%	98.9%
100	91.3%	88.5%	97.4%
200	76.5%	62.9%	94.8%

Отримані дані (табл. 3) показують, що при малому навантаженні механізм переговорів є найбільш ефективним. Однак при $N=200$ ефективність класичних методів різко падає. CNP страждає від перевантаження черги повідомлень, а механізм переговорів все більше натикається на тайм-аути, оскільки агенти витрачають надто багато часу на узгодження, поки ситуація у системі змінюється. Метод резонансних запитів зберігає високу результативність (>94%) завдяки швидкості: краще прийняти субоптимальне рішення миттєво, ніж шукати ідеальне надто довго. До таких висновків спонукає аналіз значень (табл. 4) відхилення від теоретичного оптимуму O_{gap} , що визначався перед запуском кожного прогону моделювання.

Таблиця 4

Відхилення від теоретично оптимуму O_{gap}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	12.4%	1.5%	5.8%
50	14.8%	2.2%	6.5%
100	18.2%	3.8%	7.9%
200	24.5%	5.1%	9.2%

Як бачимо, метод резонансних запитів поступається механізму переговорів на 4-5%, що пояснюється швидким вибором агента-виконавця для підвищення швидкодії та зменшення трафіку. Метод може спонукати до обрання не найближчого робота, а того, хто першим «зрезонував» (наприклад, через кращий заряд батареї, навіть якщо він тро-

хи далі). Проте запропонований метод стабільно перевершує CNP, оскільки функція резонансу враховує комплексний стан агента при менших затратах на комунікацію.

Висновки. Під час цього дослідження було розроблено метод резонансних запитів (RRM), що забезпечує механізми координації та вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників. За умови динамічної невизначеності та обмежених ресурсів отримано математичні залежності функції резонансу та часу відгуку. Було описано та проаналізовано вхідні та вихідні параметри методу, зокрема вектори станів агентів та порогові значення резонансу, способи їх отримання.

На основі проведеного аналізу встановлено, що ефективність розподілу завдань суттєво залежить від спеціального налаштування адаптивного порогу відповідності агента-виконавця до запиту. При його оптимальних параметрах комунікаційне навантаження системи набуває стабільного мінімуму з майже константною складністю взаємодії $O(k)$ незалежно від кількості агентів, що вказує на ефективну фільтрацію запитів між агентом-ініціатором і виконавцями. Також були виконані дослідження методу за допомогою програмної реалізації імітаційної моделі «розумного складу» на мові Python з використанням бібліотеки SimPy. Проведені експерименти показали високу ефективність функціонування такої системи з оптимально налаштованими параметрами, що дозволило знизити трафік на понад 90% порівняно з класичним протоколом контрактної мережі (CNP). Порівняльний аналіз показав високу ефективність функціонування запропонованої мультиагентної архітектури з оптимально налаштованими параметрами резонансної взаємодії.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку точності знаходження оптимальних рішень (зменшення відхилення від глобального оптимуму) та оцінку швидкості його роботи в гетерогенних середовищах. Окрім того, будуть проаналізовані інші варіанти побудови функції резонансу, зокрема із застосуванням методів машинного навчання (Reinforcement Learning), та відповідно умови й можливість їх застосування для створення адаптивних цифрових двійників складних кіберфізичних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0-Inception, Conception and Perception," *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021): P.P. 530–53
2. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. - Springer, 2017. - P. 85–113.
3. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. - 2nd ed. - Chichester : Wiley, 2009. - 484 p.
4. О.В.Атаманюк, Є.С.Сулема. Аналіз методів вирішення конфліктів у мультиагентній моделі цифрового двійника складної системи // Доповідь на 18 науковій конференції ПМК-2025, КПІ, «Політехніка», 2025, С. 114 - 118.
5. Chikoti, Santosh. Conflict Resolution Techniques in Multi-Agent Systems: Technical Review. *European Modern Studies Journal*. 9., 2025, P.P. 831-840
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of DigitalTwins: A Survey // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533

7. Smith R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver / R. G. Smith // IEEE Transactions on Computers. - 1980. - Vol. C-29, No. 12. - P. 1104–1113.
8. Boella G. Norm-Based Contract Net Protocol for Coordination in Multi-Agent Systems / G. Boella, L. van der Torre // IEEE International Conference on Intelligent Agent Technology. - 2008.
9. Resmerita S. Conflict Resolution in Multi-Agent Systems / S. Resmerita, M. Heymann // Proceedings of the 2004 American Control Conference. - 2004.
10. Gao S. An Improved Contract Net Protocol for Task Allocation in Multi-Agent Systems / S. Gao, H. Lei, D. Wang // Algorithms. — 2019. — Vol. 12, No. 4. — P. 70.
11. Ferreira P. Auction and Contract Net Protocols in Multi-Agent Systems / P. Ferreira, N. Baloian // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. - 2013.
12. Aheleroff, S. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey / S. Aheleroff, et al. // ResearchGate. – 2022. – P. 1-18.

REFERENCES

1. X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, “Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, Conception and Perception,” Journal of Manufacturing Systems 61 (2021): P.P. 530–53
2. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. - Springer, 2017. - P. 85–113.
3. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. - 2nd ed. - Chichester : Wiley, 2009. - 484 p.
4. O. V. Atamaniuk, Ye.S.Sulema, Analysis of the conflict resolution methods in the multiagent model of the digital twin of the complex system // Report at the 18th scientific conference AMC-2025, KPI, 2025, P. 114 -118.
5. Chikoti, Santosh. Conflict Resolution Techniques in Multi-Agent Systems: Technical Review. European Modern Studies Journal. 9., 2025, P.P. 831-840
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of DigitalTwins: A Survey // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533
7. Smith R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver / R. G. Smith // IEEE Transactions on Computers. - 1980. - Vol. C-29, No. 12. - P. 1104–1113.
8. Boella G. Norm-Based Contract Net Protocol for Coordination in Multi-Agent Systems / G. Boella, L. van der Torre // IEEE International Conference on Intelligent Agent Technology. - 2008.
9. Resmerita S. Conflict Resolution in Multi-Agent Systems / S. Resmerita, M. Heymann // Proceedings of the 2004 American Control Conference. -2004.
10. Gao S. An Improved Contract Net Protocol for Task Allocation in Multi-Agent Systems / S. Gao, H. Lei, D. Wang // Algorithms. - 2019. - Vol. 12, No. 4. - P. 70.
11. Ferreira P. Auction and Contract Net Protocols in Multi-Agent Systems / P. Ferreira, N. Baloian // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. - 2013.
12. Aheleroff, S. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey / S. Aheleroff, et al. // ResearchGate. – 2022. – P. 1-18.

Received 15.12.2025.
Accepted 19.12.2025.

Resonance request method for conflict resolution in the multiagent systems of the digital twins

Various approaches to organizing interaction and coordination in distributed systems are considered. The centralized approach has a big disadvantage due to scalability limits and single points of failure. The classic decentralized approach cannot be used in some cases due to the high communication overhead and latency. One of such cases is the conflict resolution in multi-agent digital twins, where the Resonance Request Method can be really useful.

The purpose of the research is to develop a method of creating a communication and conflict resolution mechanism, which will provide the possibility of determining the optimal task allocation based on state similarity.

The paper examines the interaction dynamics of the system "initiator - executor". Under the condition of dynamic environments, the mathematical model of the resonance function and selective query filtering was obtained. In view of the use in cyber-physical systems, the input and output parameters of the method were described and analyzed, as well as the methods of obtaining them.

As a result of the evaluation of the speed of the method using Python simulation, a modification of the search way for the optimal sensitivity threshold was proposed.

The comparative analysis showed the high efficiency of the proposed coordination system with optimally adjusted resonance parameters. The proposed method allows to reduce the communication traffic by approximately 90% compared to standard protocols. Also, the method made it possible to speed up the requests processing by an average of 3-10 times, reduce the load on the network and handle cases when real-time coordination is a rather difficult problem.

The input and output parameters of the method and ways of obtaining them were described and analyzed. A comparative numerical analysis showed the high efficiency of the functioning of such a conflict resolution system with optimally adjusted parameters of the resonance requests.

Атаманюк Олексій Віталійович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

ORCID: 0000-0002-9038-9691

Сулема Євгенія Станіславівна – докт. техн. наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

ORCID: 0000-0001-7871-9806

Atamaniuk Oleksii – PhD student of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ORCID: 0000-0002-9038-9691

Sulema Yevgeniya – DSc, Ass. Professor, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ORCID: 0000-0001-7871-9806

К.О. Бодю, С.М. Вовк

ІНТЕРАКТИВНИЙ ВЕБ-РЕСУРС З ВИВЧЕННЯ ІНФОРМАТИКИ У ЗАКЛАДАХ ЗАГАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ ІЗ ПІДКЛЮЧЕННЯМ ШІ-АГЕНТА

Анотація. Наведено огляд освітнього процесу з інформатики у закладах загальної середньої освіти в умовах впровадження реформи Нової Української Школи. Розглянуто сучасні цифрові інструменти з організації та проведення освітнього процесу, визначено їх недоліки та невідповідності реформі. Запропонована та розроблена пілотна версія інтерактивного веб-ресурсу з вивчення інформатики із застосуванням ШІ-агента. Подано результати тестування розробки та дослідження ефективності допомоги штучного інтелекту у навчальному процесі вивчення інформатики.

Ключові слова: веб-ресурс, освіта, штучний інтелект, інформатика, нова українська школа, openai, python, javascript.

Постановка проблеми. На сьогодні у сфері загальної середньої освіти Міністерство освіти і науки України впроваджує реформу Нової української школи (НУШ), спрямовану на докорінну зміну формату подачі навчального матеріалу та системи оцінювання знань учнів. Її мета полягає у переході від традиційної моделі навчання до моделі навчання на основі компетентнісного підходу, що ґрунтується на формуванні ключових умінь і навичок, необхідних для життя у сучасному суспільстві. Оскільки більшість наявних навчальних цифрових платформ та ресурсів створювалися для підтримки класичних форм навчання, постає питання їх відповідності новим вимогам. Це становить виклик для освітньої системи, оскільки виникає потреба у розробці та впровадженні інноваційних засобів, здатних забезпечити інтерактивність і персоналізацію процесу навчання, а також об'єктивність оцінювання його результатів.

Реформа НУШ змінює роль учителя, який стає фасилітатором освітнього процесу, а не лише джерелом знань [1]. Від нього очікується створення комфортного середовища для розвитку учнів, використання сучасних технологій та інтеграція цифрових інструментів у навчальний процес. Таким чином, НУШ відкриває нові горизонти для української освіти, але водночас ставить перед педагогами та розробниками освітніх програм та відповідних ресурсів завдання пошуку ефективних рішень для оцінювання та підтримки процесу навчання у епоху цифрових рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифрові інструменти стають дедалі важливішими в освітньому процесі, допомагаючи зробити його більш структурованим, ефективним та привабливим. Вони широко використовуються для забезпечення досту-

пності учасників навчального процесу, інтерактивного подання матеріалу та персоналізації процесу навчання.

Згідно з останніми дослідженнями Інституту цифровізації освіти НАПН України було виявлено [2], що для організації та здійснення дистанційного та змішаного навчання респонденти використовували такі цифрові інструменти: Viber – 78,4%; Zoom – 65,4%; сайт навчального закладу – 23,5%; Google workspace for education – 20,2%; МійКлас – 19,5%; Електронний щоденник – 15,4%; Навчальна платформа навчального закладу – 14,3%; Telegram – 13,3%; Padlet – 11%; FlippedClassroom – 10,9%; Microsoft Office 365 – 7,6%; Microsoft Teams – 4,7%; WhatsApp – 3,3%; Moodle – 3,2%.

Для проведення уроків та позакласних заходів учителі та педагогічні працівники застосовували такі ресурси: На Урок – 84,7%; YouTube – 73,1%; Всеосвіта – 71%; Всеукраїнська школа онлайн – 41,6%; EdEra – 29%; соціальні мережі (Facebook, Instagram) – 24,5%; Learning.ua – 21,4%; Prometheus – 16,6%; Блоги (мережеві журнали, щоденники подій) – 11,7%; Kahoot – 9,9%; Цифрова освіта «Дія» – 8,5%; Classtime – 7,8%; відеоуроки на ТРК «Київ» та місцевих телеканалах – 6,5%; Edpuzzle – 1,4%; TED – 1,1%.

Утім функціонал зазначених платформ не призначений для НУШ-оцінювання та не здатний повністю задовольнити вимоги реформи. Зокрема, в них відсутнє автоматизоване оцінювання за групами розвитку, підсумкові роботи та статистика. Крім того, зазначені платформи не забезпечують у повному обсязі реалізацію компетентнісно-орієнтованого підходу та персоналізації навчання.

Зі стрімким розвитком штучного інтелекту постало також питання його впровадження у сферу освіти. У дослідженнях кафедри інформаційно-комунікаційних технологій в освіті факультету природничих наук і технологій Університету Раджабхат Махасаракхам у Таїланді за 2025 р. був проаналізований вплив різних технологій ШІ на результати навчання, використовуючи настанови PRISMA та декілька аналітичних підходів, зокрема новітні застосування алгоритмів Naive Bayes, TF-IDF та моделей на основі BERT [3]. Загальний аналіз виявив значний позитивний розмір ефекту Хеджеса [4] (Hedges' $g = 0,86$, 95%-й довірчий інтервал (ДІ) [0,45, 1,27]), що свідчить про суттєві переваги інтеграції ШІ в освіту. Особливої уваги заслуговує вплив чат-ботів та генеративного ШІ (Hedges' $g = 1,02$, 95% ДІ [0,45, 1,59]), які продемонстрували найістотніший позитивний вплив на результати навчання студентів. Онлайн-навчання та застосування віртуальної реальності показали помірний позитивний ефект (Hedges' $g = 0,79$, 95% ДІ [-0,04, 1,62]), тоді як системи управління навчанням (LMS) та ШІ-платформи продемонстрували перспективний, проте стриманіший вплив (Hedges' $g = 0,62$, 95% ДІ [0,03, 1,21]) [3].

Отже, інтеграція штучного інтелекту в освітнє середовище може сприяти підвищенню якості навчання завдяки наданню персоналізованої допомоги учням у процесі засвоєння нових знань. Водночас сучасні освітні системи, цифрові сервіси та ресурси (як українські, так і світові) або не мають такого функціоналу, або пропонують його в обмеженому форматі. Тому актуальною задачею є розробка інтерактивного веб-ресурсу з вивчення інформатики на основі сучасних інформаційних технологій, який відповіда-

тиме новітнім стандартам НУШ та міститиме ШІ-агента для підтримки учнів у навчанні.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності навчального процесу з інформатики шляхом створення інтерактивного веб-ресурсу з елементами штучного інтелекту відповідно до вимог реформи Нової Української Школи.

Основна частина. Для вирішення поставленої задачі було запропоновано та розроблено інтерактивний веб-ресурс у вигляді клієнт-серверного застосунку [6], [7]. Загальна архітектура інтерактивного веб-ресурсу наведена на рис. 1. Серверна частина відповідає за обробку запитів, автентифікацію користувачів, збереження та обробку даних, взаємодію з базою даних і зовнішніми сервісами, зокрема, з API штучного інтелекту. Клієнтська частина забезпечує відображення інтерфейсу користувача, інтерактивну взаємодію, введення та відправлення даних. Користувачі (вчителі, учні та адміністратори школи), можуть заходити на веб-ресурс через інтерфейс у браузері без прив'язки до пристрою.



Рисунок 1 - Загальна архітектура інтерактивного веб-ресурсу

Сторінки веб-ресурсу згруповані згідно ролей користувачів, якими є вчителі, учні та адміністратори школи.

Вчитель має можливість створювати завдання трьох типів: завдання з відкритою відповіддю, тестові завдання і завдання на програмування, де учні мають писати код на мові Python. До завдань із програмування вчитель може увімкнути чи вимкнути допомогу ШІ-агента. Після відправлення завдань, вчитель може на відповідній сторінці переглянути результат виконання завдання і оцінити його.

Клієнтська частина реалізована з використанням мови розмітки HTML5 та мови стилів CSS. Для прискорення написання коду клієнтської частини був використаний

шаблонізатор Jinja2. За допомогою цього інструменту було прибрано дублювання коду на сторінках шляхом створення сторінок-шаблонів та їх подальшого розширення на інші сторінки. Було створено наступні сторінки-шаблони: шаблон службових сторінок, шаблон сторінок адміністратора, шаблон сторінок учня та вчителя, шаблон сторінок створення завдання вчителя та шаблон сторінок виконання завдань учнем. За допомогою фреймворка Bootstrap було організовано каркас сторінок, панелі навігації та компоненти.

Дизайн графічного інтерфейсу користувача було виконано у пастельних кольорах. Знімок екрану інтерфейсу сторінки входу представлено на рис. 2.

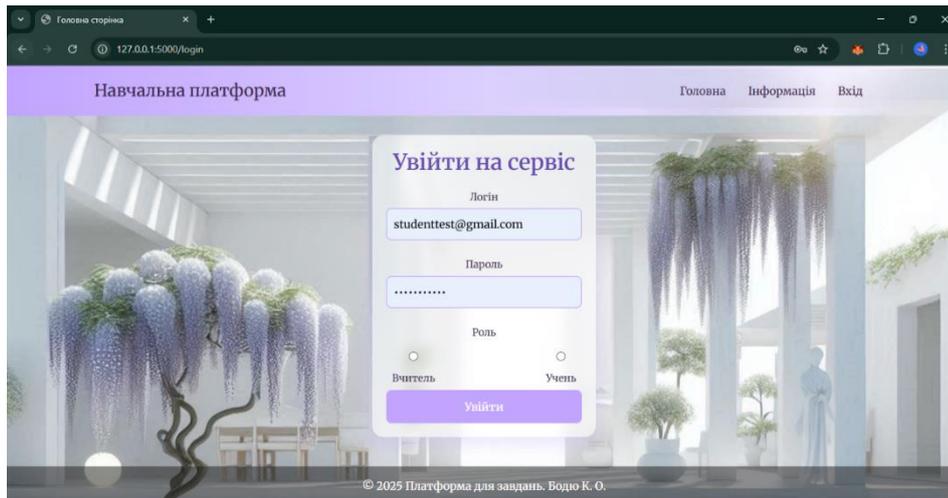


Рисунок 2 – Сторінка входу на інтерактивний веб-ресурс

Бекенд-частина інтерактивного веб-ресурсу була розроблена мовою програмування Python на основі фреймворку Flask, який призначений для розробки веб-застосунків за специфікацією WSGI (Web Server Gateway Interface) та входить до екосистеми Pallets Projects.

Для відправлення відповідей учнів було використано механізм Fetch API, що забезпечує здійснення асинхронних HTTP-запитів до веб-серверів та дозволяє передавати дані у форматі JSON.

Для кожної сторінки на бекенді було налаштовано шлях (rout). Роути сторінок були розділені і згруповані в окремі файли за допомогою механізму Flask Blueprint, який дозволив розділити логіку сторінок учня, вчителя, адміністратора, службових сторінок та функцій обробки даних.

Усі дані користувачів та завдань зберігаються у базі даних, створеної на основі SQLite. SQLite - це легка вбудована реляційна система керування базами даних, що дозволяє зберігати всю базу даних в одному файлі, не потребує конфігурації та є безкоштовною. Утім у подальшому заплановано перехід на об'єктно-реляційну систему керування базами даних PostgreSQL.

Взаємодія з базою даних на бекенді відбувається у вигляді запитів, які здійснюються за допомогою бібліотеки sqlite3, яка включена у стандартну бібліотеку Python. Додавати у базу даних завдання, оцінки та результати розв'язання завдань можуть як

учні, так і вчителі. Додавати або видаляти користувачів з бази даних можуть лише адміністратори на відповідних сторінках.

Інтеграція ШІ-агента була реалізована за допомогою моделі OpenAI-mini-5. Це є полегшена версія великої мовної моделі OpenAI, яка найкраще підходить для розв'язання поставленої задачі в умовах обмеженого використання функцій моделі OpenAI. Робота з моделлю OpenAI-mini-5 здійснюється за допомогою бібліотеки openai мови Python. У головному файлі app.py були налаштовані як параметри підключення, так і заданий базовий промпт, у якому вказані інструкції до роботи: допомагати учню у розв'язанні завдання, а не розв'язувати завдання за нього. Фрагмент коду функції, що відповідає за запуск ШІ-агента, наведено на рис.3.

```
from openai import OpenAI
client = OpenAI(api_key=os.getenv("OPENAI_API_KEY"))
@app.route("/ai_help", methods=["POST"])
def ai_help():
    data = request.get_json()
    task_text = data.get("task", "")
    messages = data.get("messages", [])

    if not any(msg["role"] == "system" for msg in messages):
        system_prompt = (
            "Ти – доброзичливий помічник учня з програмування. "
            "Не розв'язуй задачу повністю. "
            "Замість цього став навідні запитання, пояснюй
принципи, "
            "допомагай зрозуміти і знайти рішення самостійно."
        )
        messages.insert(0, {"role": "system", "content":
system_prompt})
        messages.insert(1, {"role": "user", "content": f"Ось
завдання: {task_text}"})

    try:
        response = client.chat.completions.create(
            model="gpt-3.5-turbo",
            messages=messages,
            temperature=0.7
        )
```

Рисунок 3 – Фрагмент коду функції, що відповідає за запуск ШІ-агента

У першому рядку на поданому фрагменті програмного коду підключається бібліотека openai мови Python, яка у другому рядку дозволяє підключити API та розпочати роботу з надсилання запитів до сервера OpenAI-mini-5. Окрім промпту, у повідомлення додається текст самого завдання, щоб ШІ-агент не просто давав загальні підказки, а підказував, як виконувати конкретне завдання. Здатність ШІ-агента майже

миттєво надавати інформацію може підірвати критичне мислення та мотивацію. Тому ШІ-агента слід використовувати для підказок та заохочення глибших досліджень, а не лише для швидких відповідей [8].

Логіка взаємодії з інтелектуальним помічником винесена в окремий файл `ai_chat.js`. У ньому реалізовано керування модальним вікном та функцію зчитування змісту завдання безпосередньо з активного блоку веб-сторінки. Процес обробки запиту активізується натисканням кнопки “Допомога ШІ”, після чого текст завдання разом із відповідними інструкціями передається до моделі. Фрагмент програмного коду, що реалізує цей механізм, наведено на рис. 4.

```
fetch("/ai_help", {
  method: "POST",
  headers: {
    "Content-Type": "application/json"
  },
  body: JSON.stringify({
    task: taskText,
    messages: messageHistor })
})
.then(response => response.json())
.then(data => {
  const aiReply = data.reply;
  chatContainer.innerHTML += `

<strong>ШІ:</strong>
  ${aiReply}</p>`;
  messageHistory.push({ role: "assistant", content:
  aiReply });
})


```

Рисунок 4 – Фрагмент коду керування модальним вікном ШІ-агента

Алгоритм роботи ШІ-агента передбачає виконання асинхронного запиту до серверного маршруту `/ai_help` за допомогою методу `fetch`. У тілі запиту передаються дані про поточне завдання та історію діалогу у форматі JSON. У разі виникнення помилок інформація про збій виводиться користувачу, а технічні деталі події фіксуються в консолі. Такий підхід забезпечує надійну інтеграцію клієнтської частини з API ШІ-агента, що дозволяє реалізувати інтерактивну підтримку в межах навчального веб-ресурсу.

Знімок частини екрану під час роботи ШІ-агента для простого завдання представлено на рис. 5. На ньому наведена сторінка виконання завдання на програмування, блок для написання коду та блок запущеного чату із ШІ-помічником.

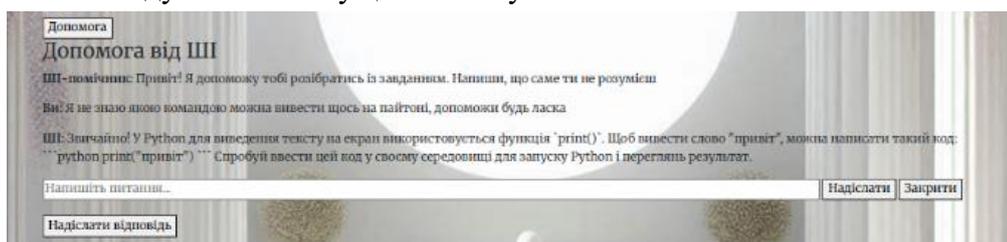


Рисунок 5 – Приклад запуску допомоги ШІ на сторінці виконання завдання

Для роботи з API-ключем ШІ-агента додатково підключена бібліотека dotenv. Це є "чутливі" дані, і тому вони зберігаються у змінній середовища в .env-файлі, що є необхідним, насамперед, задля безпеки. Для взаємодії веб-застосунку, розробленому на базі Flask, із файлом конфігурації використано бібліотеку dotenv, яка зчитує конфігураційний файл та робить API-ключі доступними для програми через стандартний інтерфейс. Такий підхід забезпечує належний рівень безпеки освітньої платформи, гарантуючи, що доступ до потужностей штучного інтелекту залишиться захищеним.

Було проведено тестування розробленого веб-ресурсу, в ході якого за допомогою інструмента Google Lighthouse була перевірена ефективність роботи його основних сторінок. Результати показали, що пілотна версія інтерактивного веб-ресурсу спроектована і працює належним чином, сторінки завантажуються швидко і код є оптимізованим. Знімок екрану результатів тестування сторінки вчителя наведено на рис. 6.

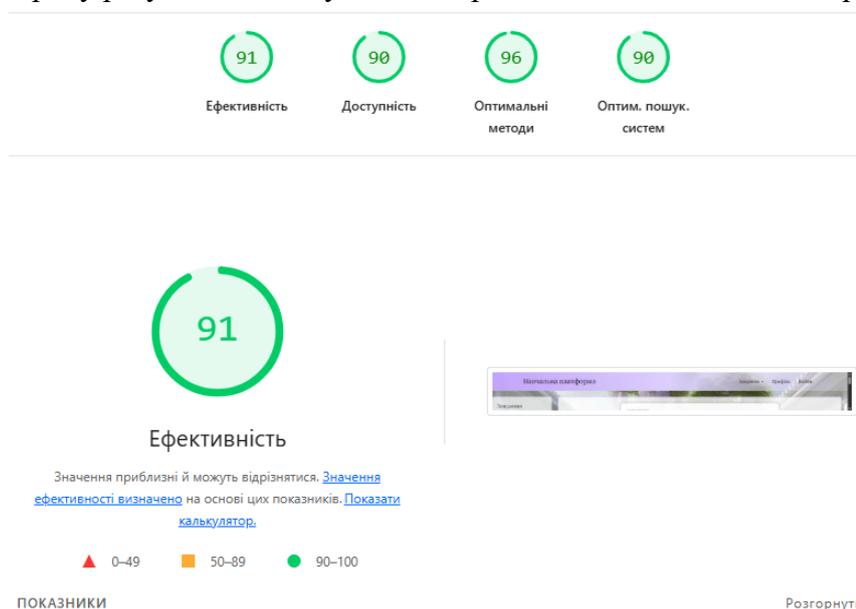


Рисунок 6 – Результати тестування сторінки вчителя

На базі Дніпровського Ліцею №120 (м. Дніпро) було проведено дослідження ефективності використання ШІ у навчальному процесі. Учні протягом обмеженого часу уроку опрацьовували нову тему на пілотній версії інтерактивного веб-ресурсу у двох групах. Для першої групи доступ до допомоги ШІ був відкритий, тоді як для другої групи доступ до допомоги ШІ був закритий. Після виконання учнями завдань самостійної роботи була перевірена якість виконання цих завдань за категоріями отриманих балів та часу, витраченого учнями на відповіді. Статистика результатів за зазначеними категоріями наведена на рис. 7, де група А – це група із допомогою ШІ, а група Б – це група без допомоги ШІ.

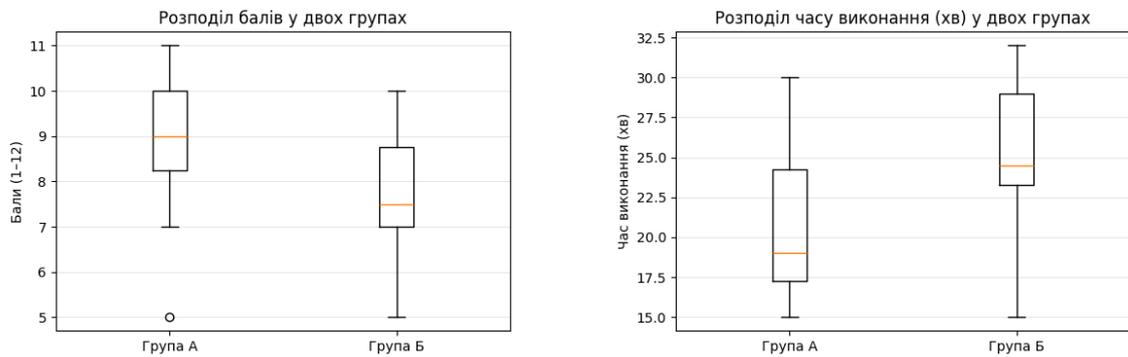


Рисунок 7 – Статистичні результати з ефективності використання ШІ

Згідно отриманих результатів можна зробити висновок, що штучний інтелект позитивно впливає на якість засвоєння знань. Проте, оскільки дослідження проводилось в умовах обмеженого часу та невеликої вибірки, отримані результати можуть не відображати генеральну сукупність даних. Отже, отримані результати є основою для подальших досліджень на ширших вибірках. Зокрема, є доцільним провести дослідження окремо для молодшої школи, середньої, старшої, а також провести дослідження серед учнів закладів освіти різних типів і форм власності.

Представлений інтерактивний веб-ресурс можна розгорнути на сервері, після чого він стає доступним для використання через веб-браузер для користувачів за наявності у них доступу до мережі Інтернет. При цьому учні та вчителі можуть отримати доступ до веб-ресурсу з будь-якого пристрою. Це є зручним в умовах сьогодення, оскільки не потребує використання комп'ютера й дозволяє виконувати завдання та отримувати доступ до навчальних матеріалів з телефону. Повна інструкція до запуску пілотної версії інтерактивного веб-ресурсу разом із вихідним кодом системи зберігається у сховищі OneDrive [7].

Висновки. Створено освітній інструмент у вигляді інтерактивного веб-ресурсу, який поєднує потужність генеративного штучного інтелекту із сучасними стандартами веб-розробки. Функціонал інтерактивного веб-ресурсу задовольняє вимогам Нової Української Школи. Вибір стеку технологій (Python, Flask, dotenv) дозволив реалізувати надійну та безпечну архітектуру, чітке розмежування конфігураційних даних і програмного коду, що гарантує захист інтелектуальних ресурсів та стабільність системи. Перспективи подальших досліджень полягають в розширенні функціоналу веб-ресурсу, модернізації налаштувань ШІ-агента та впровадженні глибшої аналітики навчальних досягнень, що сприятиме створенню цілісного цифрового середовища у межах сучасного закладу повної загальної середньої освіти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Наумкіна Н. І. Сучасний педагог: тьютор, модератор, навігатор, фасилітатор чи просто вчитель. URL: <https://naurok.com.ua/suchasniy-pedagog-tyutor-moderator-navigator-fasilitator-chi-prosto-vchitel-326839.html>
2. Биков В. Ю., Овчарук О.В., Іванюк І. В., Пінчук О. П., Гальперіна В. О., Сучасний стан використання цифрових засобів для організації дистанційного навчання в закладах

загальної середньої освіти: результати опитування 2022. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2022. С. 1-18.

3. Jincheng Z., Thada J., Rukthin L., Meta-Analysis of Artificial Intelligence in Education. *Higher Education Studies*. Canadian Center of Science and Education. 2025. Vol. 15, N. 2. P. 189-210.

4. Hedges L. V., Distribution theory for Glass' estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*. 1981. Vol. 6, N. 2 P. 107-128.

5. Бодю К., Вовк С. Інтерактивний веб-ресурс з вивчення інформатики в контексті нової української школи. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2025)*: Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції, Дніпро, 19-21 листопада 2025 р. Під загальною редакцією О.М. Кісельової. Дніпро: ДНУ, 2025. С. 85-86.

6. Бодю К., Вовк С. Інтерактивний веб-ресурс з навчання інформатики з інтеграцією ШІ-агента. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2025)*: Тези доповідей на X Всеукраїнській науково-практичній конференції: 26-28 листопада 2025 р., м. Дніпро. Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, ПП «Ліра ЛТД», 2025. С. 84-85.

7. Бодю К. Вихідний код інтерактивного веб-ресурсу. URL: <https://1drv.ms/f/c/c7517a483258278e/IgA1T9CYK9eJSJKtG0vjJf6wAZyPFIfEnIS8WlnAb0EvXFc?e=EVeArI>

8. Xu T., Tong R., Liang J., Fan X., Li H., Wen Q. Foundation Models for Education: Promises and Prospects. *IEEE Intelligent Systems*. 2024. Vol. 39, N. 3 P. 20-24.

REFERENCES

1. Naumkina N. I. The modern teacher: tutor, moderator, navigator, facilitator, or just a teacher. URL: <https://naurok.com.ua/suchasniy-pedagog-tyutor-moderator-navigator-fasilitator-chiprosto-vchitel-326839.html>

2. Bykov V. Yu., Ovcharuk O. V., Ivaniuk I. V., Pinchuk O. P., Halperina V. O. The current state of using digital tools for organizing distance learning in general secondary education institutions: survey results 2022. *Information Technologies and Learning Tools*, 2022. P. 1-18.

3. Jincheng Z., Thada J., Rukthin L. Meta-Analysis of Artificial Intelligence in Education. *Higher Education Studies*. Canadian Center of Science and Education. 2025. Vol. 15, N. 2 P. 189-210.

4. Hedges L. V., Distribution theory for Glass' estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*. 1981. Vol. 6, N. 2 P. 107-128.

5. Bodiu K., Vovk S. Interactive web resource for learning computer science in the context of the New Ukrainian School. *Mathematical and Software Support of Intelligent Systems (MPZIS-2025)*: Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference, Dnipro, November 19–21, 2025. Edited by O. M. Kiselova. Dnipro: Oles Honchar Dnipro National University, 2025. P. 85–86.

6. Bodiu K., Vovk S. Interactive web resource for teaching computer science with AI agent integration. *Prospective Directions of Modern Electronics, Information and Computer Systems (MEICS-2025)*: Proceedings of the X All-Ukrainian Scientific and Practical Conference,

Dnipro, November 26–28, 2025. Dnipro: Oles Honchar Dnipro National University, Lira LTD, 2025. P. 84–85.

7. Bodiу K. Source code of the interactive web resource. URL: <https://1drv.ms/f/c/c7517a483258278e/IgA1T9CYK9eJSJKtG0vjJf6wAZyPFIfEnIS8WlnAb0EvXFc?e=EVearI>

8. Xu T., Tong R., Liang J., Fan X., Li H., Wen Q. Foundation Models for Education: Promises and Prospects. *IEEE Intelligent Systems*. 2024. Vol. 39, N. 3 P. 20-24.

Received 17.12.2025.

Accepted 22.12.2025.

Interactive web resource for teaching computer science in general secondary education with AI agent integration

The paper presents the design, implementation, and evaluation of an interactive web-based educational resource that aimed at supporting the teaching and learning of computer science in general secondary education within the framework of the New Ukrainian School reform. The study's relevance is determined by the ongoing digitalization of education and the growing demand for flexible, interactive, and student-centered learning environments that correspond to modern educational standards.

The proposed web resource integrates contemporary web technologies and includes role-based access for students, teachers, and administrators, enabling the creation, completion, and assessment of various types of learning tasks. Special attention is given to the integration of an AI-based assistant, which provides contextual support for students during programming tasks and can be enabled or disabled by the teacher depending on pedagogical objectives.

The research methodology includes an evaluation of the system's technical performance, usability, and reliability, as well as an experimental comparison of learning outcomes for students working with and without AI assistance. The results indicate that AI-supported learning can positively influence learning efficiency without replacing the teacher's role in the educational process.

The developed solution demonstrates the potential of AI-enhanced educational digital platforms to support competency-based learning and personalized instruction. It can serve as a foundation for further development of digital educational systems aligned with the principles of the New Ukrainian School. The results demonstrate the effectiveness and feasibility of using AI agents to improve the quality and personalization of computer science education.

Бодю К'яра Олександрівна - магістр кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID <https://orcid.org/0009-0001-9911-9399>.

Вовк Сергій Михайлович - канд. фіз.-мат. наук, доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8116-3500>.

Bodiу Kiara Oleksandrivna - Master's student of the Department of Computer Science and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID <https://orcid.org/0009-0001-9911-9399>.

Vovk Sergiy Mykhailovych - PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8116-3500>.

А.В. Пікільняк, Н.І. Цивінда

СТРАТЕГІЇ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Анотація. У статті виконано комплексне дослідження проблематики підготовки інженерів-механіків за напрямом конструкторсько-технологічної підготовки виробництва в умовах дистанційного навчання, зумовленого воєнним станом в Україні. Обґрунтовано роль систем управління життєвим циклом виробу (PLM) як фундаментального інструменту формування цифрових компетенцій інженера-механіка. Проведено детальний порівняльний аналіз архітектури, функціональних можливостей та ліцензійної політики провідних світових платформ, таких як: Siemens Teamcenter, Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE, PTC Windchill та вітчизняної системи IT-Enterprise. Розглянуто технічні аспекти організації віддаленого доступу та питання інформаційної безпеки. Акцентовано увагу на перевагах впровадження вітчизняної платформи для вивчення процесів технологічного нормування, управління собівартістю та формування документації згідно з ДСТУ. Запропоновано методичні рекомендації щодо інтеграції різнорідних CAD/CAM/CAE/PLM систем у єдиний освітній простір університету.

Ключові слова: PLM-системи, цифрова трансформація освіти, дистанційне навчання, управління життєвим циклом, конструкторсько-технологічна підготовка виробництва, управління інженерними даними, цифровий освітній простір

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку світового машинобудування характеризується переходом до концепції «Індустрія 4.0», де ключовим активом стає не лише фізичне виробниче обладнання, а й цифрові дані. У цій парадигмі процес створення нового виробу трансформується у створення його цифрового двійника (Digital Twin), який супроводжує продукт на всіх етапах: від маркетингової ідеї та ескізного проектування до експлуатації та утилізації. Відповідно, змінюються і кваліфікаційні вимоги до інженера-механіка. Сучасний фахівець повинен володіти не лише навичками 3D-моделювання (CAD), а й компетенціями роботи в єдиному інформаційному просторі підприємства, розуміти принципи управління даними про виріб (PDM), логіку технологічної підготовки (CAPP) та планування ресурсів (ERP).

В умовах воєнного стану в Україні система вищої технічної освіти постала перед безпрецедентним викликом - необхідністю забезпечення якості інженерної підготовки в умовах тривалого дистанційного навчання та нестабільності інфраструктури. Традиційна модель навчання, що базується на фізичній присутності студентів у комп'ю-

терних класах та лабораторіях університету, стала частково або повністю недоступною. Це призвело до розриву між теоретичними знаннями та практичними навичками: студенти можуть вивчити теорію механізмів, але втрачають можливість працювати з ліцензійним промисловим програмним забезпеченням, яке зазвичай вимагає потужних робочих станцій та захищених локальних мереж.

Особливої гостроти набуває проблема конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПВ). Якщо геометричне моделювання можна частково реалізувати на персональних ноутбуках студентів за допомогою навчальних версій САД-систем, то процеси колективної роботи, управління версіями документів, узгодження змін та технологічного нормування вимагають розгортання складних серверних PLM-платформ. В умовах блекаутів, міграції студентів та викладачів, а також обмеженого фінансування ЗВО, виникає нагальна потреба у пошуку та впровадженні програмних рішень, які б поєднували хмарну архітектуру, низькі вимоги до клієнтського обладнання, економічну доступність та повну відповідність вітчизняним стандартам (ДСТУ, ЄСКД, ЄСТД). Ігнорування цієї проблеми загрожує випуском фахівців, не готових до реалій сучасного виробництва, що є критичним ризиком для післявоєнної відбудови промислового потенціалу України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика управління життєвим циклом виробу є предметом ґрунтовних досліджень у світовій науці. Фундаментальні основи PLM як стратегічного підходу до бізнесу викладені у працях Дж. Старка [1]. Автор визначає PLM не просто як набір програмного забезпечення, а як інтегровану інформаційну стратегію, що об'єднує людей, процеси та технології. Концепцію цифрових двійників, яка є ядром сучасних PLM-систем, детально розкрито у дослідженнях М. Гривза та Дж. Вікерса [2], де обґрунтовано необхідність синхронізації віртуальної моделі з фізичним об'єктом у реальному часі. Ці роботи формують теоретичний базис дослідження, однак вони орієнтовані переважно на стабільні економіки та розвинену ІТ-інфраструктуру, не враховуючи специфіку кризових умов.

Питання цифрової трансформації вищої освіти в Україні в умовах воєнного стану активно розглядаються у вітчизняній періодиці. Так, аналіз практик підготовки інженерних фахівців у навчально-науково-виробничих центрах технічних університетів показує, що інтеграція PLM-та САД/CAM/CAE-систем у навчальний процес сприяє формуванню ключових цифрових компетенцій та наближенню освітніх програм до вимог промисловості [3]. Інші дослідження вказують на необхідності адаптації конструкторсько-технологічних баз даних і впровадження автоматизованих PLM-рішень, що оптимізують електронні довідники, управління доступом і виконання технологічних операцій, як складової навчального процесу в технічних ЗВО України [4] Автори слушно зазначають, що фрагментарне вивчення окремих програмних пакетів не дає студентам цілісного уявлення про життєвий цикл виробу. Важливим аспектом є інтеграція інженерних та управлінських даних. У своїй праці J. Duda [5] розглядає інтеграцію PLM та ERP систем як основу цифрової трансформації машинобудівних підприємств, вказуючи на необхідність подолання «клаптикової автоматизації».

Проте, аналіз наявних публікацій дозволяє виявити низку невирішених питань:

1. Домінування західних прикладів. Більшість досліджень фокусуються на продуктах світових лідерів – Siemens Teamcenter [6], Dassault Systèmes або PTC Windchill. При цьому недостатньо уваги приділяється проблемам адаптації цих систем до українських стандартів оформлення технічної документації (ДСТУ ISO 9001 [7], ДСТУ 8302 [8]), що є критичним для підготовки інженерів, які працюватимуть у правовому полі України.

2. Технічні бар'єри. Існуючі методики часто ігнорують технічні обмеження дистанційного навчання (низька пропускна здатність каналів зв'язку, слабке "залізо" у студентів). Питання порівняння "важких" клієнтських додатків та веб-орієнтованих рішень у контексті доступності для студента висвітлено недостатньо.

3. Вітчизняний софт. Попри наявність потужних українських розробок, зокрема платформи IT-Enterprise [9], у науковій літературі бракує комплексних порівняльних досліджень, які б зіставляли функціонал вітчизняного ПЗ зі світовими аналогами саме в розрізі освітнього потенціалу. Часто вітчизняні системи розглядаються лише як ERP (бухгалтерія/склад), тоді як їхні можливості у сфері PDM/PLM та технологічної підготовки залишаються поза увагою дослідників.

Таким чином, актуальність даної роботи зумовлена необхідністю заповнити цю прогалину та надати науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору PLM-середовища, яке б відповідало сучасним стандартам ISO [10], враховувало специфіку національного машинобудування та було ефективним в умовах дистанційної освіти воєнного часу.

Мета дослідження полягає у проведенні системного порівняльного аналізу функціональних можливостей сучасних PLM-систем для забезпечення повного циклу конструкторсько-технологічної підготовки виробництва в умовах дистанційної освіти, оцінці їх технічної доступності та відповідності вимогам українського машинобудування.

Викладення основного матеріалу дослідження. Процес підготовки виробництва на конструкторсько-технологічному рівні відзначається значною складністю інформаційних взаємозв'язків між конструкторськими та технологічними рішеннями, що особливо актуалізується за умов дистанційного навчання. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від програмних засобів, які забезпечують узгоджену роботу з 3D-моделями, технологічними маршрутами та супровідною документацією. За таких умов актуальним є аналіз сучасних PLM-систем з погляду їх функціональних можливостей і придатності до використання в освітньому процесі.

Аналіз цих платформ свідчить про істотні відмінності їх архітектури, функціональних можливостей та придатності до використання в освітньому процесі. Так, система Siemens Teamcenter є однією з найпоширеніших у світі та фактичним галузевим стандартом для аерокосмічної й автомобільної промисловості. Її сильними сторонами є глибока інтеграція з CAD-системою NX та середовищем Simcenter, а також розвинені механізми управління конфігураціями виробів, що містять значну кількість компонентів. Водночас класична клієнт-серверна архітектура цієї системи є ресурсоємною та

вимагає потужного апаратного забезпечення і стабільного каналу зв'язку, що ускладнює її використання в умовах дистанційного навчання. Наявність web-клієнта Active Workspace частково знімає ці обмеження, проте його впровадження потребує значних серверних ресурсів і високої кваліфікації ІТ-персоналу, що є проблематичним за умов нестабільного енергопостачання. Крім того, академічні ліцензії часто мають обмеження, пов'язані з прив'язкою до інфраструктури конкретного закладу вищої освіти, що ускладнює роботу студентів поза університетськими лабораторіями.

Платформа Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE реалізує інший концептуальний підхід, відмовляючись від файлової моделі зберігання даних на користь об'єктно-орієнтованої бази та концепції бізнес-досвіду. Вона надає потужні інструменти системної інженерії та моделювання складних виробів, однак її використання в освітньому процесі обмежується вимогами до стабільного високошвидкісного інтернет-з'єднання, складністю інтерфейсу користувача та високою вартістю підписки навіть за академічними програмами. Додатковим недоліком є недостатня адаптація платформи до вимог ЄСКД, що змушує студентів виконувати значну частину оформлення конструкторської документації вручну.

PLM-система PTC Windchill із самого початку розроблялася з урахуванням web-архітектури, що забезпечує зручний віддалений доступ і роботу з використанням апаратних засобів середнього класу. Значною перевагою є інтеграція з технологіями доповненої реальності та Інтернету речей, які дозволяють реалізовувати навчальні сценарії з використанням цифрових двійників реального обладнання. Разом із тим складність налаштування бізнес-процесів під специфіку окремих навчальних дисциплін обмежує її гнучкість у контексті освітніх програм.

Окремої уваги заслуговує вітчизняна система ІТ-Enterprise, яка поєднує функціональність PDM та SAP і розробляється з урахуванням реалій українського виробництва. На відміну від більшості зарубіжних PLM-рішень, вона забезпечує повну відповідність вимогам національних стандартів, зокрема ДСТУ, автоматично формуючи маршрутні та операційні карти, а також іншу технологічну документацію. Розвинені довідники обладнання, інструменту й матеріалів, а також вбудовані алгоритми розрахунку режимів різання та норм часу дають змогу студентам виконувати не формальне, а реальне технологічне нормування. Важливою перевагою є інтеграція інженерних рішень з економічними показниками, що дозволяє в режимі реального часу оцінювати вплив вибору матеріалів і технологій на планову собівартість виробу. Наявність сучасного web-клієнта, мобільного застосунку та лояльної академічної політики, орієнтованої на заклади вищої освіти України, робить цю систему особливо придатною для використання в умовах дистанційного та змішаного навчання.

В таблиці 1 наведено розширене порівняння систем за ключовими критеріями, що впливають на якість освітнього процесу. Організація дистанційного навчання супроводжується суттєвими викликами, зокрема щодо апаратного забезпечення студентів. Більшість професійних CAD/PLM-систем вимагають наявності високопродуктивних графічних процесорів, тоді як у студентів вдома здебільшого доступні стандартні ноутбуки або ігрові ПК. Одним із ефективних рішень є застосування технології віртуальної

десктопної інфраструктури (Virtual Desktop Infrastructure, VDI), коли університет розгортає сервери віртуалізації, а студенти отримують доступ до віртуальних робочих середовищ через веб-браузер, при цьому всі обчислювальні процеси виконуються на сервері.

Таблиця 1

Комплексний аналіз PLM-систем для підготовки інженерів-механіків

Критерій	Siemens Teamcenter	Dassault 3DEXPERIENCE	PTC Windchill	IT-Enterprise
Архітектура	SOA (Service Oriented Architecture). Потребує "товстого" клієнта для повної функціональності.	Data-driven Platform. Cloud (SaaS) або On-premise.	Web-centric. Java-based architecture.	Трирівнева архітектура. Web-клієнт, Smart-клієнт.
Вимоги до каналу зв'язку	Високі (особливо для передачі 3D-збірок).	Високі. Потребує стабільного з'єднання з хмарою.	Середні. Добре оптимізований web-трафік.	Середні. Можливість роботи з кешованими даними.
Адаптація до ДСТУ (ЄСКД/ЄСТД)	Низька. Потребує дорогої кастомізації та розробки шаблонів звітів.	Низька. Орієнтація на стандарти ISO/ANSI.	Середня. Можливість налаштування звітів	Висока. Вбудовані форми документів, класифікатори та довідники ДСТУ.
Функціонал САРР (Технологія)	Teamcenter Manufacturing (потужний, але складний).	DELMIA (орієнтація на симуляцію робіт та ергономіку).	MPMLink (структурований, але потребує наповнення баз).	Потужний модуль. Розрахунок режимів, нормування праці та матеріалів
Вартість впровадження ЗВО	Висока (сервери, адміністрування).	Висока (підписка).	Середня/Висока.	Середня (партнерські програми для українських ЗВО).
Безпека даних (локалізація)	Сервери можуть бути за кордоном	Хмара переважно в ЄС/США.	Залежить від інсталяції.	Локалізація в Україні. Можливість розгортання в захищеному периметрі ЗВО.

Вітчизняна система IT-Enterprise має специфічну перевагу в цьому контексті: завдяки оптимізованому веб-клієнту вона значно менш вимоглива до ресурсів VDI у порівнянні з рішеннями Siemens або Dassault, що дозволяє знизити навантаження на

серверну інфраструктуру університету та забезпечує стабільну і доступну роботу студентів у дистанційному середовищі.

В умовах війни та обмеженого фінансування університетів, вартість володіння ПЗ виходить на перший план. Закупівля комерційних ліцензій західних систем часто є недосяжною. Водночас, компанія IT-Enterprise [9] активно підтримує освітні ініціативи, надаючи не лише доступ до ПЗ, а й методичні матеріали. Стратегічно важливо розуміти, що після завершення війни почнеться масштабна відбудова промисловості України. Підприємствам знадобляться фахівці, які розуміють специфіку локального виробництва, вміють працювати з національною нормативною базою та вітчизняним софтом на сотнях підприємств.

Висновки. Дистанційна підготовка інженерів-механіків вимагає переходу від фрагментарного освоєння окремих інструментів до комплексного використання PLM-платформ, що забезпечують системне мислення та наскрізне розуміння життєвого циклу виробу навіть за відсутності фізичної практики. Аналіз сучасних PLM-систем показує, що західні рішення, попри технологічну перевагу, мають суттєві обмеження для масового впровадження в умовах дистанційного навчання: високі апаратні вимоги, залежність від стабільного інтернету, складність адаптації до національних стандартів та висока вартість ліцензій.

Вітчизняна система IT-Enterprise вирізняється повною відповідністю українським стандартам, наявністю готових технологічних довідників, інтегрованими інструментами управління даними та технологічними процесами, можливістю оцінки собівартості та ресурсного планування в режимі реального часу, доступністю через web- та мобільний клієнт, а також україномовним інтерфейсом. Вона дозволяє реалізувати наскрізний цифровий процес від проектування до планування та нормування, формуючи у студентів глибоке розуміння взаємозалежності інженерних рішень та практичну готовність до роботи у національному виробничому середовищі.

Найбільш ефективною є гібридна модель навчання, яка поєднує ознайомлення з логікою світових PLM-систем та детальну практичну роботу в IT-Enterprise, забезпечуючи баланс між глобальним професійним світоглядом і готовністю до реалізації інженерних рішень у реальних умовах українського машинобудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Stark J. Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation. 4th ed. Cham : Springer, 2022. 541 p. DOI: 10.1007/978-3-030-94335-6.
2. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. 2017. P. 85-113.
3. Варшав'як Г. Б., Гребеніков О. Г., Гуменний А. М., Гребеніков В. А. Досвід впровадження систем CAD/CAM/CAE/PLM в навчально-науково-виробничому центрі Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – № 97. – С. 164-194. – Режим доступу: <https://nti.khai.edu/ojs/index.php/oikit/article/view/2174/2172>

4. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи *Technologi CS* при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства машинобудування // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету ім. Д. Моторного. – 2024. – №24(1). – С. 184-194. – Режим доступу: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/704>
5. Duda J., Oleszek S., Santarek K. The Impact of PLM Systems on the Digital Transformation of Manufacturing Companies // *Advances in Production Management Systems*. – 2024. – Vol. 2. – P. 151–164. – DOI: 10.1007/978-3-031-56444-4_12.
6. Siemens Digital Industries Software. Teamcenter X: Cloud PLM. URL: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/teamcenter/teamcenter-x-cloud-plm/> (дата звернення: 29.12.2025).
7. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 22 с.
8. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
9. Управління життєвим циклом виробу (PLM) / IT-Enterprise. URL: <https://it.ua/products/rd/upravlenie-zhiznennym-ciklom-izdelija-plm> (дата звернення: 29.12.2025).
10. ISO 10303-242:2020. Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering. Geneva : ISO, 2020.

REFERENCES

1. Stark, J. (2022). *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation* (4th ed.). Cham: Springer.
2. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85-113). Springer.
3. Varshavyak, H. B., Hrebenikov, O. H., Humennyi, A. M., & Hrebenikov, V. A. (2023). *Dosvid vprovadzhennya system CAD/CAM/CAE/PLM v navchal'no-naukovo-vyrobnychomu tsentri Natsional'noho aehrokosmichnoho universytetu im. M. Ye. Zhukovs'koho “Kharkiv Aviation Institute”* [Experience of implementing CAD/CAM/CAE/PLM systems in the educational-scientific-production center of the National Aerospace University named after M. E. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”]. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, (97), 164–194. <https://nti.khai.edu/ojs/index.php/oikit/article/view/2174/2172>
4. Matsulevych, O. Y. (2024). *Zastosuvannya spetsializovanoi PLM-systemy Technologi CS pry rozrobsi avtomatizovanoi systemy vedennya konstruktors'ko-tekhnolohichnykh baz danykh pidpryyemstva mashynobuduvannya* [Application of the specialized PLM system *Technologi CS* in the development of an automated system for managing design and technological databases of a machine-building enterprise]. *Proceedings of the Tavria State agrotechnological university*, 24(1), 184–194. <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/704>

5. Duda, J., Oleszek, S., & Santarek, K. (2024). The impact of PLM systems on the digital transformation of manufacturing companies. In *Advances in Production Management Systems* (Vol. 2, pp. 151–164). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56444-4_12
6. Siemens Digital Industries Software. (n.d.). *Teamcenter X: Cloud PLM*. Retrieved December 29, 2025, from <https://plm.sw.siemens.com/en-US/teamcenter/teamcenter-x-cloud-plm/>
7. State Enterprise "UkrNDNC". (2016). *Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy* [Quality management systems. Requirements] (DSTU ISO 9001:2015). Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC" [in Ukrainian].
8. State Enterprise "UkrNDNC". (2016). *Informatsiia ta dokumentatsiia. Bibliografichne posylannia. Zahalni polozhennia ta pravyla skladannia* [Information and documentation. Bibliographic reference. General principles and rules of composition] (DSTU 8302:2015). Kyiv: State Enterprise "UkrNDNC" [in Ukrainian].
9. IT-Enterprise. (n.d.). *Upravlinnia zhyttievym cyblem vyrobu (PLM)* [Product Lifecycle Management (PLM)]. Retrieved December 29, 2025, from <https://it.ua/products/rd/upravlenie-zhiznennym-ciklom-izdelija-plm> [in Ukrainian].
10. International Organization for Standardization. (2020). *Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 242: Application protocol: Managed model-based 3D engineering* (ISO Standard No. 10303-242:2020).

Received 26.12.2025.
Accepted 05.01.2026.

Strategies of digital transformation in the training of mechanical engineers under distance learning conditions

This study addresses the challenges of training mechanical engineers in design and technological production under distance learning imposed by martial law in Ukraine. The sudden shift to remote education revealed significant gaps in practical training, especially in access to industrial-grade software for collaborative design, version control, and technological data management. Product Lifecycle Management (PLM) systems are essential tools for developing digital competencies and understanding the full product lifecycle.

Recent research emphasizes the strategic role of PLM in integrating design, process planning, and production data, supporting the use of digital twins and synchronizing virtual and physical product models. Integrating PLM with CAD/CAM/CAE systems in higher technical education enhances digital skills and aligns programs with industry needs. However, adaptation of PLM platforms to remote learning conditions, national standards, and limited IT infrastructure is not yet fully explored.

The study evaluates modern PLM system - Siemens Teamcenter, Dassault 3DEXPERIENCE, PTC Windchill, and the domestic IT-Enterprise platform - considering functionality, technical accessibility, compliance with DSTU standards, web availability, VDI compatibility, and cost efficiency for higher education.

The study concludes that effective digital transformation requires combining exposure to global PLM concepts with hands-on practice in nationally adapted platforms. A hybrid approach fosters systemic understanding of the product lifecycle, practical readiness for local manufacturing, and competencies aligned with industry standards. Methodological recom-

mendations are provided for integrating diverse CAD/CAM/CAE/PLM tools into a unified digital educational environment.

Keywords: PLM systems, digital transformation of education, distance learning, product lifecycle management, design and technological training, engineering data management, digital educational environment.

Пікільняк Андрій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

Цивінда Наталія Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

Pikilniak Andrii – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

Tsyvinda Nataliia – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЧЕРГ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ SEO-ОПТИМІЗОВАНИХ ТЕКСТІВ У ВИСОКОНАВАНТАЖЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Анотація. Робота присвячена розробці системи для автоматизованої генерації SEO-оптимізованих текстів з подальшим моделюванням системи черг для зниження витрат на створення якісного контенту, спрощення процесу генерації текстів та забезпечення їх відповідності сучасним SEO-вимогам. Дослідженню механізмів взаємодії з ШІ-сервісами для оптимізації процесу генерації текстів в умовах обмежень на кількість запитів та швидкість обробки даних. Проведені дослідження наявних рішень для автоматичної генерації контенту, у тому числі розглянуті сервіси на базі штучного інтелекту, такі як ChatGPT. У результаті були виявлені обмеження існуючих підходів, пов'язані переважно з їхньою недостатньою масштабованістю або обмеженнями API. Синтезована Q-схема для вирішення конкретної задачі, адаптований асинхронний моделюючий алгоритм, здійснене моделювання системи черг SEO-оптимізованих текстів. Вдосконалені алгоритми взаємодії з ШІ-сервісами забезпечують стабільну та ефективну роботу, дозволяють не лише здешевити процес наповнення контентом, але й зробити його максимально ефективним, зберігаючи якість текстів на рівні, що не поступається роботі професійних копірайтерів.

Ключові слова. SEO-оптимізовані тексти, ШІ-сервіси, Q-схема.

Постановка проблеми. Останні роки стали переломними у сфері автоматизації завдяки стрімкому розвитку технологій штучного інтелекту (далі ШІ). Інструменти на основі машинного навчання, такі як неймережі для генерації текстів, відкрили нові можливості для автоматизації контент-маркетингу та інших бізнес-процесів. Раніше написання статей, описів товарів і маркетингових матеріалів вимагало значних людських ресурсів, однак сьогодні з'явилися ШІ-сервіси, здатні виконувати цю роботу з високим рівнем якості та швидкості.

Комерційні ШІ-системи вже досягли рівня, при якому вони можуть замінити професійних копірайтерів у багатьох завданнях. Алгоритми глибокого навчання аналізують великі обсяги текстових даних, імітуючи стилістику та логіку написання людини. Це дозволяє створювати тексти, що відповідають вимогам якості, унікальності та SEO-оптимізації.

SEO (Search Engine Optimization) – це комплекс методів і стратегій, спрямованих на покращення позицій вебсайтів у результатах пошукових систем, таких як Google. Оптимізовані тексти повинні бути унікальними, містити релевантні ключові слова та

відповідати вимогам алгоритмів ранжування. Впровадження ШІ у процес створення контенту дозволяє не лише автоматизувати його написання, але й враховувати актуальні вимоги SEO для досягнення кращих результатів у пошукових системах.[1]

Автоматизація процесу наповнення сайтів контентом особливо актуальна для інтернет-магазинів, маркетингових агентств, блогерів та інформаційних платформ. Раніше для написання та оптимізації великого обсягу текстів потрібно було залучати команди копірайтерів та редакторів, що вимагало значних фінансових вкладень. Використання ШІ-рішень дозволяє зменшити витрати на створення контенту, роблячи цей процес більш доступним для малого та середнього бізнесу. Разом із розвитком ШІ-сервісів змінюється і ринок цифрового контенту. Пошукові системи постійно оновлюють свої алгоритми ранжування, що створює додаткові виклики для SEO-оптимізації. Автоматизована генерація текстів повинна не лише забезпечувати якісне наповнення сайтів, а й відповідати сучасним вимогам SEO, таким як унікальність, релевантність та використання ключових слів у правильному контексті. Це вимагає розробки гнучких алгоритмів, які враховують зміни у пошукових алгоритмах і адаптуються до нових вимог.

Крім того, проблема високонавантаженості систем автоматизації контенту стає все більш актуальною. Використання ШІ-генерації вимагає балансування між швидкістю обробки даних та обмеженнями сервісів. Багато платформ накладають ліміти на кількість одночасних запитів, що може сповільнювати процес масового створення контенту. Тому необхідно розробляти ефективні системи черг, які забезпечують рівномірний розподіл навантаження та мінімізують затримки в генерації текстів.

Ще одним викликом є підтримка різних форматів та стилістики текстів, оскільки різні галузі бізнесу мають свої вимоги до контенту. Наприклад, опис товарів для інтернет-магазину потребує чіткої структури та акценту на ключових характеристиках, тоді як статті для блогів вимагають більш природного стилю викладу. Розробка універсальної системи автоматизації повинна передбачати можливість налаштування параметрів генерації, адаптації під різні типи контенту та інтеграцію з іншими сервісами для пост обробки текстів.

В рамках цієї роботи є розглядається процес створення системи для автоматизованої генерації SEO-оптимізованих текстів з подальшим моделюванням системи черг для зниження витрат на створення якісного контенту. Крім того, розглядається механізми взаємодії з ШІ-сервісами, що дозволяють оптимізувати процес генерації текстів в умовах обмежень на кількість запитів та швидкість обробки даних.

Аналіз існуючих рішень. На сьогоднішній день існує декілька інструментів для автоматичної генерації описів товарів, які використовуються компаніями для спрощення процесу наповнення сайтів контентом. Більшість із цих рішень інтегровані у популярні системи управління контентом (CMS) або онлайн-магазини, що дозволяє швидко створювати тексти без залучення копірайтерів. Проте існуючі системи мають ряд обмежень та проблем, які заважають їх широкому використанню в промислових масштабах.

1. Обмеженість платформ. Більшість рішень створені для конкретних платформ, таких як Shopify, OpenCart, WordPress та інші. Це означає, що їх можливості обмежені архітектурою цих платформ, і вони не можуть бути легко адаптовані для інших потреб або масштабовані на великі обсяги контенту.

2. Недостатня гнучкість налаштувань. Більшість готових рішень не дозволяють користувачам впливати на параметри генерації тексту, такі як стилістика написання, довжина тексту, рівень деталізації або специфіка використання ключових слів. Це робить такі системи малоприсадибними для бізнесів, які потребують індивідуального підходу до контенту.

3. Відсутність SEO-оптимізації. Існуючі рішення майже не враховують SEO-оптимізацію. Зокрема, вони не здійснюють перевірку на унікальність текстів, що є критично важливим для підвищення позицій сайту у пошукових системах. В результаті, автоматично згенеровані описи можуть містити дубльований контент, що негативно впливає на ранжування сторінок у пошукових системах.

4. Неможливість масової генерації. Більшість інструментів не передбачають можливості масової генерації текстів та управління процесом створення контенту у високонавантажених середовищах. Більшість сервісів не підтримують систему черг, що призводить до затримок у генерації або перевантаження сервісу при обробці великої кількості запитів одночасно.

5. Проблема довжини та якості текстів. Більшість систем створюють короткі та загальні описи, які не містять достатньої кількості унікальної інформації про товар. Це знижує їхню ефективність як інструментів для підвищення конверсії та залучення клієнтів.

Окремо варто розглянути WordPress-плагін "ШІ Content Creator - Easy ChatGPT powered article generator"[2]. Це рішення базується на інтеграції з ChatGPT, що дозволяє автоматично генерувати тексти безпосередньо через інтерфейс WordPress. Проте, з точки зору SEO, цей підхід має значні обмеження. Користувач не може задати чітку кількість ключових слів, що ускладнює налаштування контенту під вимоги пошукових алгоритмів. Також відсутня перевірка на унікальність, що може призвести до створення дублікатів контенту та негативно вплинути на ранжування сайту. По суті, цей плагін є лише спрощеним інтерфейсом для відправки запитів до ШІ-моделі, без додаткової обробки тексту, що обмежує його ефективність у промисловому використанні. SE Ranking [3] є комплексним SEO-інструментом, що включає можливості аналізу текстів та генерації контенту.

Основні особливості:

1. Інтеграція ключових слів – сервіс дозволяє гнучко налаштувати ключові слова, що сприяє створенню SEO-оптимізованого контенту.

2. Аналітика текстів і рейтинги – користувач отримує розширену аналітику текстів, включаючи їх відповідність пошуковим запитам та рейтинги якості.

3. Обмеження у генерації – система не передбачає масову генерацію текстів, а працює з кожним запитом окремо, що уповільнює процес контентного наповнення великих сайтів.

4. Мовні обмеження – SE Ranking підтримує лише англійську мову, тоді як ChatGPT працює з багатьма мовами одночасно.

5. Відсутність перевірки унікальності – сервіс не має вбудованого інструменту для перевірки тексту на унікальність, що є важливим фактором для SEO.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для створення текстів у системі був обраний сервіс ChatGPT від OpenAI. Основними причинами вибору саме цього сервісу є:

- Висока якість текстів та здатність адаптувати стиль написання під вимоги користувача.

- Гнучкість у налаштуванні параметрів генерації, що дозволяє створювати як короткі, так і розгорнуті описи товарів.

- Можливість інтеграції через API, що дозволяє автоматизувати процеси генерації текстів у веб-додатку.

Альтернативні рішення, такі як GitHub Copilot та DeepSeek, були розглянуті, але вони не підходять для цієї задачі з наступних причин:

- GitHub Copilot – орієнтований переважно на генерацію програмного коду та не адаптований для створення комерційного контенту.

- DeepSeek – показує малу стабільність та обмеження щодо довжини текстів, що критично важливо для SEO-оптимізованого контенту.

- Grok – Орієнтацією на неформальний стиль та гумор, що може бути неприйнятним для створення комерційного контенту

Інтеграція сервісів перевірки унікальності

Одним із важливих аспектів роботи системи є перевірка унікальності згенерованого контенту. Для цього планується інтеграція таких сервісів, як:

- Copyleaks – надає потужні інструменти для перевірки текстів на дублювання, підтримує API та забезпечує швидку обробку запитів.

- DupliChecker – популярний сервіс зручний для швидкої перевірки невеликих обсягів тексту.

- Prepostseo – один із варіантів для перевірки унікальності з додатковими інструментами SEO-аналізу.

Вибір декількох сервісів дозволяє підвищити точність перевірки та забезпечити коректну обробку контенту, що критично важливо для SEO-просування сайтів. Оскільки система буде працювати у високонавантаженому середовищі, важливим етапом розробки є реалізація ефективної системи черг. Черги дозволять рівномірно розподіляти навантаження між запитами, уникати перевантаження сервісу генерації текстів та забезпечувати стабільну роботу навіть при великій кількості користувачів.

Основні принципи організації черг:

- Пріоритизація запитів – можливість прискореного оброблення критично важливих запитів.

- Обмеження одночасних запитів – забезпечення рівномірного навантаження на API ChatGPT та сервіси перевірки унікальності.

- Автоматичне повторення запитів у разі помилки – запобігання втраті даних через технічні збої.

Таким чином, підхід до розробки додатку включає вибір веб-додатку як основної платформи, використання ChatGPT для генерації текстів, інтеграцію сервісів перевірки унікальності та реалізацію ефективної системи черг для стабільної роботи у високонавантажених умовах.

Вибір технологій розробки є критично важливим етапом створення інформаційних систем, оскільки саме від нього залежать продуктивність, масштабованість, надійність і можливість подальшого розширення функціоналу. У рамках цієї роботи використовується стек технологій, до складу якого входять PHP, CodeIgniter, MySQL, jQuery, HTML, Bootstrap. Вибір кожної з цих технологій зумовлений їхніми особливостями, що дозволяють створити ефективну систему генерації контенту.

Моделювання системи черг ґрунтується на розробці алгоритмів, що виконують потоки подій та функціонування компонентів системи. Основна мета моделюючого алгоритму — відображати поведінку системи таким чином, щоб вона була максимально наближена до реального процесу, але водночас залишалася ефективною з точки зору обчислювальних ресурсів.

Для оцінки продуктивності системи та визначення реальних часових витрат на генерацію та перевірки унікальності SEO-оптимізованих текстів була проведена серія практичних вимірювань. Дослідження проводилося у середовищі, що максимально наближене до робочих умов системи. Усі вимірювання здійснювалися на одному апаратному забезпеченні, з мінімальними фоновими навантаженнями, що могли б вплинути на результати

Для генерації текстів використовувався API ChatGPT (GPT-4o), який отримував запит на створення розгорнутого тексту обсягом від 10 000 до 14 000 символів. Час генерації замірявся починаючи з моменту надсилання запиту і до моменту отримання повного тексту. Було здійснено п'ять незалежних спроб, результати яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Час повернення відповіді сервісу ChatGPT

№ спроби	Час генерації (секунди)
1	34
2	41
3	57
4	39
5	46

Середній час генерації тексту склав приблизно 43,4 секунди. Варто зазначити, що відхилення у результатах можуть бути спричинені коливаннями навантаження на сервер ChatGPT у певні моменти часу, а також складністю запиту

Важливим аспектом є оцінка кількості токенів, що використовуються при генерації тексту. В середньому 1 000 символів відповідає приблизно 250 токенам. Таким чином, для тексту обсягом 10 000–14 000 символів потрібно від 2 500 до 3 500 токенів.

Вартість використання API GPT-4o складає \$0.005 за 1 000 вхідних токенів та \$0.015 за 1 000 вихідних токенів [9]. Для одного запиту середня вартість буде:

1. Вхідні токени: $300 \times \$0.005 = \0.0015
2. Вихідні токени: $3\ 000 \times \$0.015 = \0.045
3. Загальна вартість одного запиту: \$0.0465

Для порівняння, використання GPT-4-turbo коштує \$0.01 за 1 000 вхідних токенів та \$0.03 за 1 000 вихідних, що майже вдвічі дорожче. Таким чином, для завдань дипломного проєкту вибір GPT-4o є більш економічно обґрунтованим, оскільки він забезпечує прийнятний баланс між якістю та витратами.

Після генерації тексту наступним етапом є перевірка унікальності за допомогою спеціалізованих онлайн-сервісів. У межах експерименту було обрано популярний сервіс Copyleaks, який пройшов тестування у п'яти незалежних ідентичних запитах. Час обробки вимірювався аналогічним способом – від моменту завантаження тексту до отримання результату. Результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Час повернення відповіді сервісу Copyleaks

№ спроби	Час (хвилини)
1	12,0
2	19,2
3	9,2
4	14,4
5	16,4

У середньому процес перевірки унікальності займав 14,2 хвилини. Це досить суттєвий показник, оскільки в умовах масової генерації контенту такі часові витрати можуть стати «вузьким місцем» у всій системі. Зважаючи на це, доцільно розглянути можливості оптимізації етапу перевірки, наприклад, за рахунок використання швидших сервісів або паралельної обробки текстів.

Асинхронна обробка текстів. У таблиці 3 наведено кількість текстів, які можуть оброблятися паралельно за допомогою різних сервісів або інструментів:

Таблиця 3

Час повернення відповіді сервісу Copyleaks

Інструмент/сервіс	Максимальна кількість паралельних обробок
Copyleaks	50
Duplichecker	15
ChatGPT (асистенти)	30

Отримані результати свідчать про необхідність ефективного планування ресурсів для забезпечення стабільної роботи системи. Використання черг дозволяє рівномірно розподіляти навантаження, що особливо важливо у випадку роботи з великою кількістю запитів у реальному часі. Також слід враховувати, що затримки у відповідях API можуть змінюватися залежно від зовнішніх факторів, таких як завантаженість серверів

або обмеження швидкості запитів, тому подальші експерименти можуть включати аналіз впливу цих чинників.

Практичні виміри дозволили встановити орієнтовні часи виконання двох основних операцій - генерації тексту та його унікалізації. Середній час генерації одного тексту складає 43,4 секунди, у той час як перевірка унікальності займає в середньому 14,2 хвилини. Система має підтримувати обробку десятків текстів одночасно, при цьому ChatGPT (асистенти) здатен генерувати до 30 текстів паралельно, Copyleaks перевіряє до 50 текстів, а Duplichecker - до 15.

Враховуючи ці характеристики, була передбачена система з використанням моделі черг, яка дозволить рівномірно розподіляти навантаження між генераторами, сервісами унікалізації та зовнішніми перевіркою. Таким чином, завдання моделювання полягає в аналізі та оптимізації роботи такої системи на основі реальних часових параметрів і технічних обмежень.

На основі розрахунків продуктивності системи для 100 заявок дійшли наступних висновків: коефіцієнти завантаженості на етапах генерації та SEO-допрацювання ($\rho \approx 0,075$ та $\rho \approx 0,015$ відповідно) вказують на низький рівень навантаження, що означає ефективне функціонування цих компонентів із великим запасом потужності - ресурси використовуються лише на 7–8%. Водночас етап унікалізації демонструє суттєве навантаження ($\rho = 1,04$), що майже досягає критичного рівня. Це свідчить про те, що Copyleaks працює на межі своїх можливостей, а сам процес унікалізації стає головним обмежувальним чинником усієї системи. Саме тому для подальшого моделювання була обрана асинхронна циклічна модель. Усі задачі обробляються у фоновому режимі, що дозволяє системі запускати десятки паралельних процесів без блокування головного потоку. Кожна задача має свій статус виконання (`is_processing = 1`, `is_processing = 2`), що дозволяє контролювати обробку без очікування завершення інших задач. Модель підтримує обробку до 30 активних задач на кожен сервіс одночасно. Окрема увага була приділена забезпеченню повної автономності системи обробки. Замість побудови складної інфраструктури на базі RabbitMQ чи подібних брокерів повідомлень, реалізовано просту, але надійну модель через фонові PHP-процеси. Ключова роль тут відведена механізму блокування (flock) через файл `generate_worker.lock`, який гарантує, що одночасно не буде запущено кілька воркерів. Цей механізм дозволяє створити легку, незалежну чергову систему, яка не потребує постійного контролю ззовні та не залежить від сторонніх сервісів або інтерфейсів взаємодії. У випадку збоїв система самостійно завершує обробку задач, не порушуючи цілісності даних.

У наведеній нижче Q-схемі представлено логіку роботи системи, яка генерує, перевіряє та допрацьовує SEO-тексти у високонавантаженому асинхронному середовищі. Схема на рис. 1 відображає послідовні та умовні етапи, через які проходить кожне завдання, починаючи з моменту його створення до моменту виведення з системи.

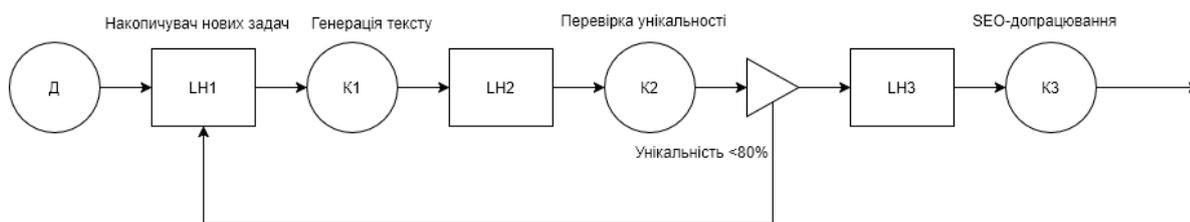


Рисунок 1 – Q-схема моделюючого алгоритму

На основі побудованої Q-схеми був розроблений асинхронно-циклічний алгоритм, який враховує специфіку високонавантаженого середовища та передбачає послідовну взаємодію між ключовими підсистемами: генерацією, перевіркою унікальності, унікалізацією, а також SEO-допрацюванням тексту.

У випадку, якщо унікальність є недостатньою (менше 80%), завдання переходить у фазу повторної генерації із залученням додаткових інструкцій для підвищення унікальності

Алгоритм побудований у вигляді циклу, який імітує роботу асинхронної обчислювальної системи. Центральним елементом цієї структури є визначення моменту настання події, що відповідає за перехід між етапами обробки в залежності від черг та станів обслуговування.

Система автоматизованої генерації SEO-оптимізованого контенту реалізована в рамках архітектурної моделі Model–View–Controller (MVC), що забезпечує чітке розділення логіки: моделі відповідають за доступ до даних, контролери - за бізнес-процеси та маршрутизацію, а представлення - за інтерфейс користувача.

Окрім основної функціональності, пов'язаної з моделюванням черг та асинхронною генерацією контенту, у межах системи реалізований CRM-компонент, який забезпечує:

- автентифікацію користувачів;
- можливість створення проєктів і розділення згенерованих текстів за ними;
- налаштування параметрів генерації, зокрема вибір асистентів;
- зручний інтерфейс для перегляду, фільтрації, редагування та завантаження згенерованих результатів.

CRM частина реалізована у вигляді класичних сторінок з контролерами, кожен з яких відповідає за свою частину логіки. Наприклад, GenerateController обробляє всі операції, пов'язані з чергами задач, їх запуском, зміною станів і логуванням. Кожен такий контролер працює з відповідними моделями та викликає представлення для взаємодії з користувачем. Механізм обробки задач побудований на зберіганні даних у реляційній базі даних. Кожна задача має статус (is_processing), що вказує на її стан у життєвому циклі: очікування, обробка, завершення, помилка тощо. Статуси відповідають етапам Q-схеми та дозволяють відслідковувати динаміку виконання. Кожна задача інкапсульована в окремий CLI-процес, що запускається через системну команду. В середині процесу реалізується повна логіка: запит до API генерації, обробка відповіді, оновлення даних у базі, перевірка унікальності та SEO, зміна статусу задачі.

Для управління чергою задач створений фоновий процес-модератор, що виконує роль диспетчера. Він постійно сканує базу на наявність задач зі статусом очікування (`is_processing = 1`) і приймає рішення про запуск нових CLI-процесів. При цьому враховується максимальне допустиме навантаження: не більше 30 задач одночасно на кожен сервіс генерації. Диспетчер перевіряє наявність задач у черзі, щоб визначити, чи є завдання, які потребують обробки. Одночасно контролюється кількість активних задач, звертаючи увагу на стан `is_processing`, який не повинен перевищувати значення 2. Перед запуском кожної задачі він змінює її статус, що дозволяє відстежувати поточний стан виконання. Для обробки команд диспетчер ініціалізує CLI-процес, забезпечуючи коректну взаємодію з системою. Також він реалізує захист від дублювання завдань за допомогою файлового блокування. Якщо ліміт досягнутий, система очікує 10 секунд (`sleep(10)`), після чого повторно перевіряє стан черги. Завдяки цьому досягається баланс між швидкістю обробки та стабільністю роботи зовнішніх сервісів (API генерації, унікалізації тощо).

Система була розгорнута на виділеному сервері з характеристиками, що значно перевищують мінімальні вимоги до неї. Сервер оснащено процесором Intel(R) Xeon(R) E-2146G з тактовою частотою 3.50 GHz та 12 ядрами, а також оперативною пам'яттю обсягом 32 ГБ, з яких у середньому використовувалося близько 11.5 ГБ під час активної роботи системи.

У процесі тестування та реального використання не було зафіксовано жодного суттєвого навантаження на ресурси системи. Це пояснюється тим, що основні обчислювальні задачі реалізовані в рамках окремої системи черг, яка функціонує незалежно від основного інтерфейсу. Черги не створюють зайвих фонових навантажень і дозволяють ефективно розподіляти задачі в часі, що запобігає піковим навантаженням.

З архітектурної точки зору також було вжито рішень, спрямованих на оптимізацію використання ресурсів. У якості фреймворку для побудови веб-застосунку використано CodeIgniter, який вирізняється високою продуктивністю та мінімальним споживанням пам'яті. Для взаємодії з базою даних замість повноцінного ORM було використано Query Builder з прямими SQL-запитами до MySQL. Це дозволило зменшити кількість звернень до бази та пришвидшити обробку кожного запиту за рахунок уникнення надлишкової абстракції.

На рис. 2 показаний час, витрачений на обробку кожної з 100 заявок. Візуально видно, що зростання часу відбувається поступово до певного порогу, після чого він стабілізується. Це пояснюється тим, що перші запити проходять без черги в `CoreLeaks`, але вже після кількох десятків запитів починається накопичення запитів у черзі самого сервісу. У результаті час перевірки починає зростати, але після стабілізації черги утворюється приблизно постійний середній час обробки. Це дозволяє зробити висновок, що навіть з урахуванням уповільнення, система в цілому стабільно виходить на певний темп виконання.

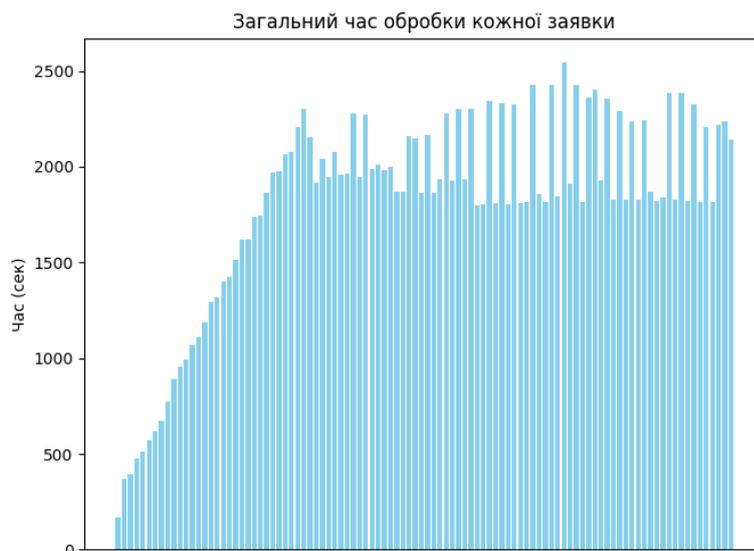


Рисунок 2 – Графік часу обробки всіх заявок

На рис. 3 показаний розклад часу по трьох основних етапах: генерація, унікальність та SEO. Найбільший обсяг часу припадає саме на етап перевірки унікальності (помаранчева зона). Генерація займає невеликий сегмент (синій), а SEO - взагалі мізерну частку (зелений). Це підтверджує гіпотезу, що основним вузьким місцем системи є саме взаємодія з зовнішнім сервісом Copyleaks. Варто зазначити, що всі етапи однаково запускалися в асинхронному режимі, тому кожне стрибкоподібне зростання часу є прямим наслідком чергового затору на етапі унікальності.

На рис. 4 кругова діаграма, яка показує частку кожного з етапів у загальному часі. Більше 96% усієї тривалості припадає саме на етап перевірки унікальності. Це демонструє критичність даного компонента у загальній архітектурі. Таке відображення дає змогу наочно ідентифікувати "вузьке місце" системи та визначити, в якому напрямку слід проводити оптимізацію.

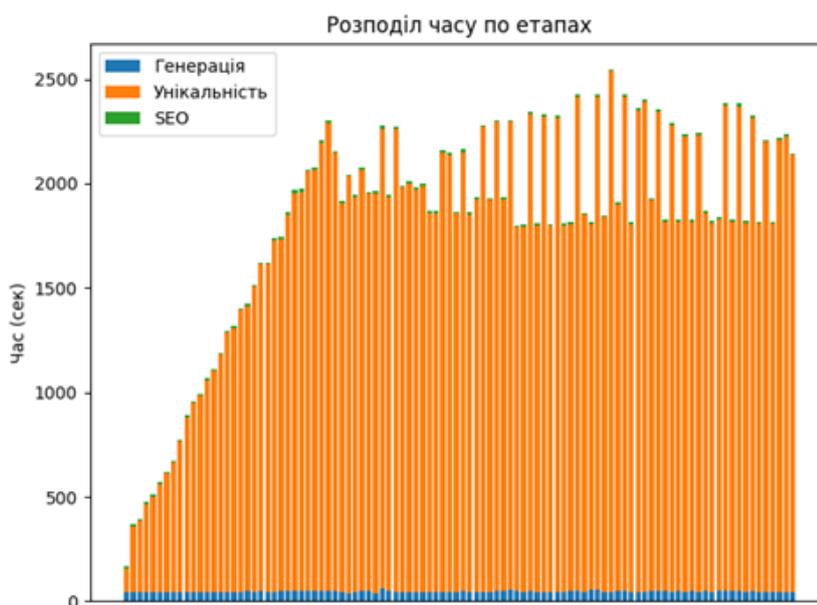


Рисунок 3 – Графік розподілу часу по етапах

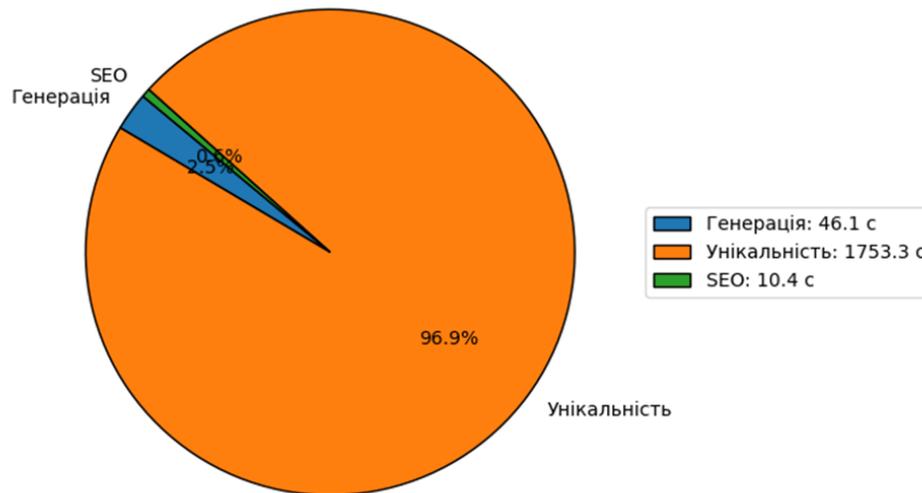


Рисунок 4 – Розподілення затраченого часу між фазами

Висновки. Створена високопродуктивна автономна система, здатна генерувати тексти описів товарів, перевіряти їх на унікальність та відповідність SEO-вимогам у режимі реального часу шляхом побудови програмного застосунку на базі веб-фреймворку CodeIgniter із використанням моделі асинхронної черги, що дозволяє одночасно обробляти велику кількість заявок. Завдяки використанню асинхронного моделюючого алгоритму Q-схеми для чергової обробки вдалося досягти оптимального балансу між швидкістю генерації, навантаженням на систему та якістю кінцевого результату.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Internet stattia “What Is SEO – Search Engine Optimization” [URL: <https://searchengineland.com/guide/what-is-seo>]
2. Rozshyrennia AI Content Creator – Easy ChatGPT powered article generator [URL: <https://wordpress.com/plugins/ai-content-creator>]
3. Platforma SE Ranking [URL: <https://seranking.com/ua/ai-writer.html>] Received 05.01.2026.

Received 05.01.2026.
Accepted 07.01.2026.

Modeling a queue system for generation of seo-optimized texts in a highly loaded environment

The work is dedicated to the development of a system for automated generation of SEO-optimized texts with subsequent modeling of the queue system to reduce the costs of creating high-quality content, simplify the process of generating texts and ensure their compliance with modern SEO requirements. Research on mechanisms of interaction with AI services to optimize the process of generating texts under conditions of restrictions on the number of requests and data processing speed. Studies of existing solutions for automatic content generation were conducted, including the consideration of services based on artificial intelligence, such as ChatGPT. As a result, limitations of existing approaches were identified, mainly related to their insufficient scalability or API limitations. A Q-scheme was synthesized to solve

a specific problem, an asynchronous modeling algorithm was adapted, and a modeling of the queue system of SEO-optimized texts was carried out. Improved algorithms for interacting with AI services ensure stable and efficient operation, allowing not only to reduce the cost of the content filling process, but also to make it as efficient as possible, while maintaining the quality of the texts at a level that is not inferior to the work of professional copywriters.

Волковський Олег Степанович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8635-6571>

Нікішина Олександра Юріївна – ст. викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2486-1859>

Volkovskyi Oleh Stepanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Science and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8635-6571>

Nikishyna Oleksandra Yuriivna – Senior Lecturer of the Department of Computer Science and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2486-1859>

В.В. Спирінцев, О.В. Спирінцева, Є.С. Дубіна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МІКРОСЕРВІСНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ КОРИСТУВАЧІВ ТА РЕСУРСІВ ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ AWS

Анотація. Розроблено прототип мікросервісної системи моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS засобами мов програмування C# і Go. Виконано експериментальне тестування продуктивності мікросервісів на екземплярах AWS EC2, проведено аналіз використання CPU, оперативної пам'яті та часу відповіді сервісів, а також розроблено методичку порівняльної оцінки ефективності реалізацій, що визначає закономірності зміни продуктивності під різними рівнями навантаження. Отримані результати визначають доцільність застосування зазначених мов програмування (C# і Go) в системах електронної комерції з хмарною архітектурою, що розширює уявлення про вибір технологій для мікросервісних систем моніторингу.

Ключові слова: мікросервіси, моніторинг, AWS, EC2, Go, C#, CPU, ефективність, ресурси.

Постановка проблеми. Розвиток електронної комерції вимагає працювати з великими обсягами даних, значною кількістю користувачів та динамічними змінами навантаження. В таких умовах важливо підтримувати стабільну роботу компонентів цифрової платформи, зокрема контролювати функціонування ресурсів. Збільшення масштабів застосунків та використання хмарних середовищ призвело до поширення мікросервісної архітектури [1], яка розподіляє логіку системи між незалежними компонентами. Це забезпечує масштабованість і можливість оновлення окремих сервісів без зупинки всієї системи. Аналіз властивостей і якості реалізації мікросервісної системи дає можливість визначити та забезпечити стабільність функціонування платформи. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності моніторингу мікросервісних систем у хмарних середовищах електронної комерції, зокрема на платформі AWS, через порівняння реалізацій на різних мовах програмування та визначення доцільності їх використання у високонавантажених системах, зокрема забезпечення стабільності та продуктивності компонентів системи, оптимізації використання обчислювальних і мережевих ресурсів, підвищенні швидкодії обробки запитів користувачів та ефективності управління ресурсами в умовах динамічного навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Офіційні публікації AWS [1] надають комплексне технічне обґрунтування спостережуваності у мікросервісних системах. Документація AWS описує, як сервіс Amazon CloudWatch забезпечує збирання, обробку й

аналіз метрик, журналів та подій для компонентів системи з метою повного контролю продуктивності й стану AWS-ресурсів та додатків. До ключових елементів належать: *метрики використання CPU, пам'яті, затримок, логи, централізовані аналізи*, а також налаштовані *алерти* для автоматичного реагування на зміни стану системи. Такий підхід дозволяє виявляти аномалії й оперативно оптимізувати роботу сервісів у хмарному середовищі AWS. В роботі [2] було запропоновано модельно-орієнтований підхід для безперервного інжинірингу продуктивності у мікросервісних системах шляхом зв'язку між архітектурою системи та даними моніторингу. В роботі [3] було здійснено систематичний аналіз інструментів DevOps і моніторингу мікросервісів. В роботі [4] було оцінено *вплив хмарної мікросервісної архітектури на продуктивність додатків*, розглянуто метрики продуктивності (час відгуку, пропускну здатність, масштабованість і надійність) для порівняння cloud-native архітектур із монолітними. В роботі [5] розглянуто *уніфікований моніторинг мікросервісів із застосуванням Prometheus і Grafana*, як масштабованого рішення для збору метрик, конфігурації алармів і візуалізації даних продуктивності, що доповнює моніторинг AWS CloudWatch та підкреслює *важливість розширеного моніторингу для складних розподілених систем*. В роботі [6] здійснено *огляд методів та оцінено сучасні техніки для оперативного виявлення аномалій і аналізу причин збоїв у сервіс-орієнтованих та мікросервісних хмарних додатках, що є ключовою частиною моніторингу та забезпечення надійності. Але можливості подальшого вдосконалення та розвитку даного напрямку досліджень ще не вичерпані та потребують розгляду*.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності мікросервісного моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS шляхом порівняння його реалізацій засобами мов програмування C# і Go та аналізу отриманих результатів для визначення доцільності застосування кожної мови у високонавантажених системах електронної комерції.

Основна частина. Для прототипу мікросервісної системи було розгорнуто шість екземплярів Amazon EC2 (рисунок 1) на операційній системі Linux Ubuntu. П'ять вузлів містять по два мікросервіси кожен, окрім сервісу автентифікації, який розгорнуто окремо. Один екземпляр виділено під базу даних MySQL. Усі екземпляри мають тип екземпляру t3.micro, що має два логічні процесорні ядра, та 1 ГБ оперативної пам'яті. Всі вузли розташовані в одній VPC з виділеною підмережею для тестового прототипу, забезпечуючи мережеву ізоляцію та взаємодію між сервісами. Для забезпечення мережевої доступності та взаємодії мікросервісів налаштовані правила груп доступ, що дозволяють вхідний трафік на такі порти: TCP 80 використовується для HTTP-запитів до інтерфейсів сервісів; TCP 443 застосовується для HTTPS-з'єднань, та забезпечує захищену передачу даних між користувачами та сервісами, включаючи авторизацію, обробку платежів, управління сесіями та передачу метрик; TCP 22 призначений для підключення до екземплярів через SSH. Використовується для керування вузлами, оновлення системи, розгортання сервісів та діагностики роботи прототипу; TCP 3306 відкритий

для підключення до бази даних MySQL. Вузли з мікросервісами можуть виконувати запити до бази даних для створення та отримання інформації.

Name	Instance ID	Instance state	Instance type	Status check	Alarm status	Availability Zone	Public IPv4 DNS	Public IPv4 ...	Elastic IP
Auth-Node	i-0b80996dd6c3fc67b	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-51-20-71-154.eu-n...	51.20.71.154	-
Audit-Metrics-Node	i-0e7afeaf94d5d28b2	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-13-60-48-97.eu-no...	13.60.48.97	-
User-Session-Node	i-0f14bb31bcc4d2db6	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-16-171-55-121.eu-...	16.171.55.121	-
Product-Cart-Node	i-0ea9a5d3bb21e8280	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-51-21-135-165.eu-...	51.21.135.165	-
Order-Payment-Node	i-0fe830eb90a0e9a1e	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-51-21-253-232.eu-...	51.21.253.232	-
DB	i-0f6f31018568d20bf	Running	t3.micro	3/3 checks passed	View alarms +	eu-north-1a	ec2-13-51-47-247.eu-n...	13.51.47.247	-

Рисунок 1 – Представлення розгорнутих екземплярів в консолі AWS

Набір вхідних точок охоплює повний життєвий цикл взаємодії користувача з системою та обробки бізнес-процесів. Через HTTP-запити реалізовано перевірку прав доступу, керування сесіями та контроль активності. Окремі групи вхідних точок забезпечують отримання, зміну та керування даними. Відповіді на запити повертаються в форматі JSON. Таким чином, структура відображає модульний підхід до побудови системи, де кожна група запитів реалізує окрему частину логіки, а взаємодія між ними здійснюється через стандартизовані HTTP-інтерфейси.

Для роботи з системою та її модулями розроблено інтерфейс, який забезпечує взаємодію користувача з мікросервісами та статистичними даними (рисунок 2).

Загальний огляд системи

Активні сервіси: 9

Сервіс	Статус	Остання метрика	CPU (avg)	RAM (avg)	Response (avg)
Auth-Node	актив	14:32:05	52%	78 MB	70 ms
User-Session-Node	актив	14:32:10	55%	80 MB	74 ms
Product-Cart-Node	актив	14:32:12	49%	72 MB	76 ms
Order-Payment-Node	актив	14:32:15	66%	95 MB	92 ms
Metric-Audit-Node	актив	14:32:20	45%	70 MB	65 ms

Рисунок 2 – Інформаційна дошка сервісу метрик

Блок загального огляду системи відображає середній час відповіді, завантаження CPU і пам'яті конкретних мікросервісів. Зокрема, реалізовано пошук і фільтри для відбору мікросервісів та їх метрик за часом. Деталізовані метрики представляють інформацію про роботу окремих мікросервісів у системі та їх ресурсоспоживання за певний період. Для кожного сервісу фіксуються такі параметри: тип операції, використання CPU, обсяг пам'яті, час відповіді та ідентифікатор запиту. Метрики збираються окремо для реалізацій на Go і C#, що дозволяє порівнювати продуктивність і споживання ресурсів між мовами. Графічне відображення метрик формується на основі агрегованих значень, для відстеження трендів завантаження CPU, використання RAM і часу відповіді сервісів у реальному часі. Таблиці подій показують часову послідовність дій, ресурсне навантаження та унікальні ідентифікатори для кожної операції.

На рисунку 3 наведено порівняння того, як мікросервіси на основні поточних даних за обраним часом споживають ресурси системи.

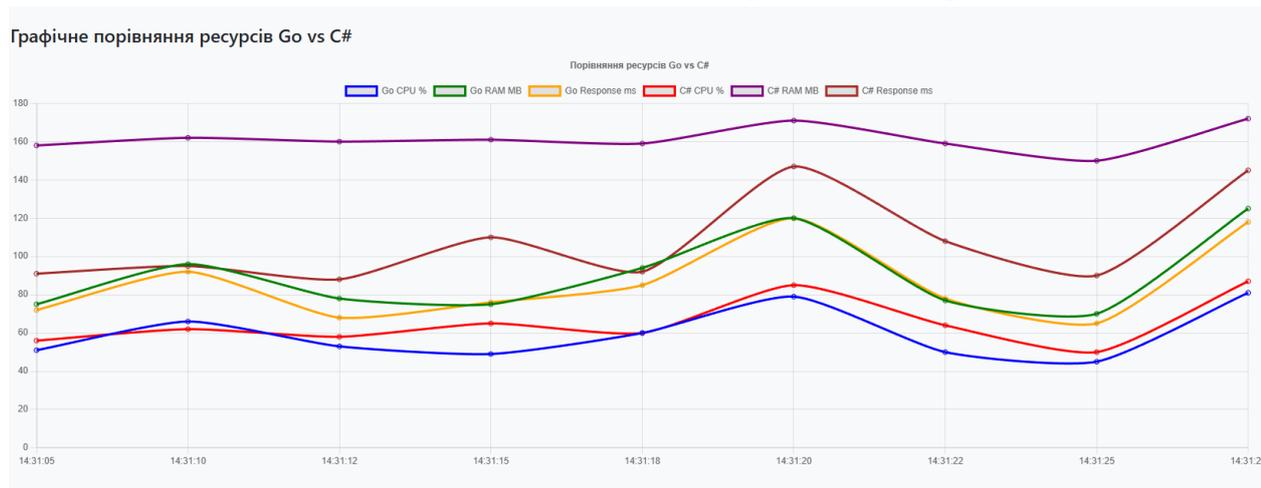


Рисунок 3 – Графічне порівняння ресурсів C# і Go за часом

Окремо розроблено інтерфейс для моніторингу ефективності подій мікросервісів. Графік відображає ефективність роботи сервісу автентифікації користувачів за обраний час (рисунок 4), та демонструє, як змінюються ключові показники ресурсоемності сервісу під час виконання операцій. Додатково на сторінці наведено числові показники: загальна кількість зареєстрованих користувачів, кількість активних користувачів та кількість активних сесій. Також надаються дані, що відображають хронологію подій які відбувалися у сервісі автентифікації та управління сесіями протягом часу.

Дані сервісу користувачів відображають список зареєстрованих користувачів із зазначенням їхнього статусу, дати реєстрації та часу останнього входу.

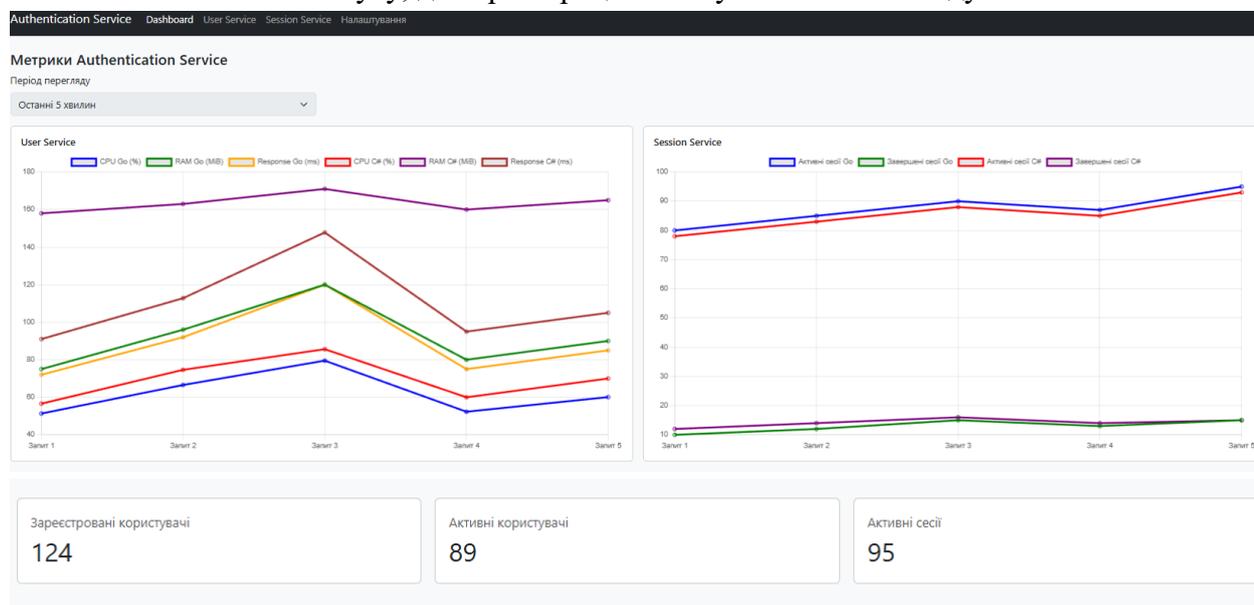


Рисунок 4 – Метрики сервісу автентифікації

Для порівняння ефективності роботи мікросервісів був розроблений скрипт на мові PHP, який моделює поведінку користувача під час взаємодії з сервісами та збирає статистику відповідей. Скрипт здійснює серію HTTP-запитів до сервісу метрик, повто-

рюючи операції у пакетах визначеного розміру, що дозволяє імітувати одночасну активність кількох користувачів. Використання пакетної обробки запитів забезпечує реалістичне навантаження на сервіс, адже запити виконуються паралельно за допомогою механізму `curl_multi`, а результати кожного запиту зберігаються для подальшого аналізу. Для запобігання надмірного перевантаження між пакетами передбачена пауза, що імітує затримку між діями. Скрипт фіксує відповіді сервісу або помилки запитів, що дозволяє оцінити стабільність і швидкодію мікросервісу. Експеримент навантаження проводився шляхом послідовного збільшення кількості одночасних запитів до сервісу з метою оцінки його продуктивності та використання ресурсів (табл. 1). Графічне представлення графіку використання ресурсів під час запитів в системі зображено на рисунку 5. Графік демонструє зміну використання ресурсів мікросервісу метрик протягом обраного інтервалу 23 секунди для реалізацій на Go та C#. Для Go показники CPU коливаються від 45 % до 81 %, використання оперативної пам'яті – від 70 до 125 MiB, а час відповіді варіюється від 65 до 120 мс. Для C# CPU змінюється від 50 % до 87 %, оперативна пам'ять – від 150 до 172 MiB, а час відповіді – від 88 до 147 мс. Дані демонструють більш високе споживання ресурсів і повільніший час відповіді порівняно з Go, що вказує на більший вплив одночасних запитів на продуктивність сервісу.

Таблиця 1

Витрати ресурсів мікросервісу метрик під навантаженням

Кількість паралельних запитів	100	200	300
Реалізація з використанням GO, середні значення			
CPU, %	51,34	66,56	79,52
RAM Usage, МБ	75	96	126
Response Time, мс	72	92	118
Реалізація з використанням C#, середні значення			
CPU, %	56,6	74,63	85,63
RAM Usage, МБ	158	163	171
Response Time, мс	91	122,8	147,8

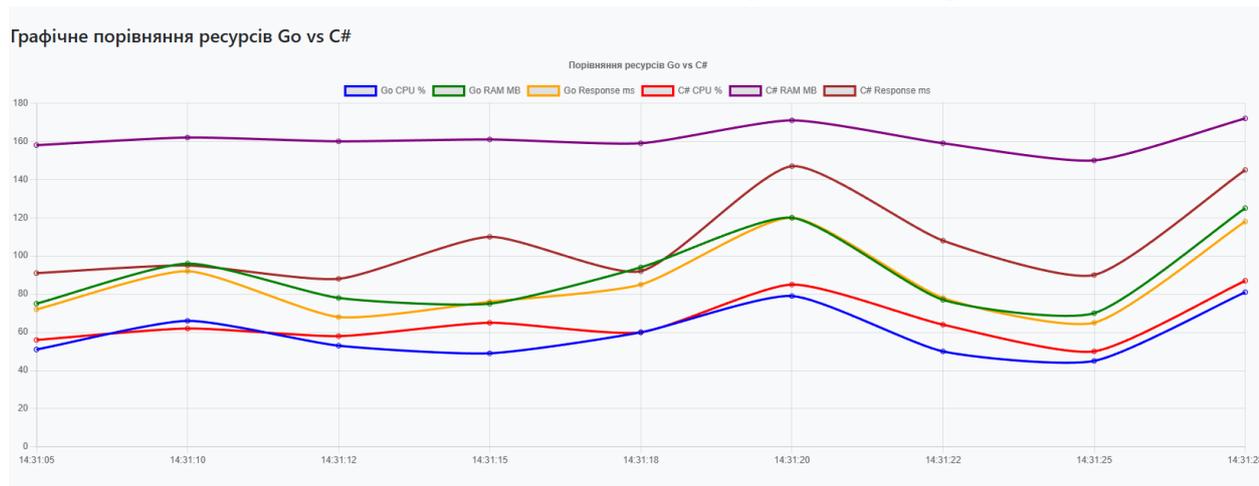


Рисунок 5 – Графік порівняння використання ресурсів для C# та Go

Для визначення поведінки застосунку під тривалим навантаженням було виконано тестування з помірним навантаженням протягом 6 хвилин (рисунок 6). Отримані метрики демонструють поведінку навантаження на процесор для обох реалізацій. Аналіз графіка CPU Utilization свідчить, що за однакового помірного навантаження значення використання процесора для реалізації на C# є вищими, ніж для реалізації на Go. Це відображено у лівій частині графіка, де зафіксовано тестування C#, у порівнянні з правою частиною, що відповідає навантаженню сервісу на Go. За метриками мережевого трафіку та кількості пакетів не спостерігається суттєвих відмінностей, які могли б пояснити зростання процесорного навантаження. За відсутності ознак обмежень з боку інфраструктури, отримані результати вказують, що підвищене значення CPU Utilization у реалізації на C# пов'язане переважно з особливостями виконання коду та внутрішньою моделлю обробки запитів.

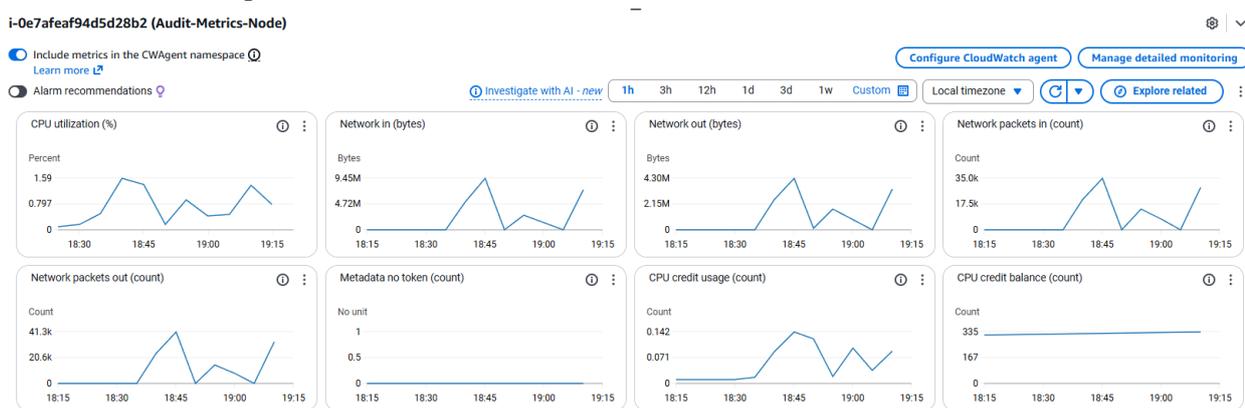


Рисунок 6 – Моніторинг ресурсів екземпляру EC2 мікросервіса метрик

Висновки. Реалізовано та досліджено мікросервісну систему моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS, а також проведено порівняльний аналіз двох реалізацій сервісу метрик на мовах C# та Go. Для відтворення навантаження, наближеного до реальної поведінки користувачів, розроблено скрипт PHP, який забезпечує паралельне виконання HTTP-запитів і збір статистики відповідей сервісу. У межах експерименту виконано серію навантажувальних тестів із поетапним збільшенням кі-

лькості одночасних запитів. Отримані результати дозволили проаналізувати використання процесорних ресурсів, оперативної пам'яті та час відповіді сервісу за різних рівнів навантаження. Порівняння середніх значень показало стабільну різницю між реалізаціями, що підтверджується як табличними даними, так і графічними результатами моніторингу в середовищі AWS EC2. Додатковий аналіз метрик тривалого помірною навантаження засвідчив, що за відсутності суттєвих відмінностей у мережевому трафіку та кількості пакетів підвищене використання CPU в реалізації на C# зумовлене особливостями виконання коду та моделі обробки запитів. Таким чином, проведене дослідження підтвердило, що реалізація мікросервісної системи моніторингу на Go за однакових умов характеризується меншим використанням CPU та оперативної пам'яті і меншим часом відповіді порівняно з реалізацією на C#, що свідчить про доцільність її використання при побудові мікросервісних систем моніторингу в хмарних середовищах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Implementing Microservices on AWS. *Monitoring Microservices on AWS*, AWS Whitepaper, 2023. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/microservices-on-aws/monitoring.html>
2. A Model-driven Approach for Continuous Performance Engineering in Microservice-based Systems. URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.09999>
3. Monitoring tools for DevOps and microservices: A systematic grey literature review. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111906>
4. L. Desina, "Evaluating the Impact of Cloud-Native Microservices Architecture on Application Performance," *arXiv preprint arXiv:2305.15438*, 2023.
5. Jani, "Unified Monitoring for Microservices: Implementing Prometheus and Grafana for Scalable Solutions," *ResearchGate*, 2024. DOI:10.51219/JAIMLD/yash-jani/206
6. J. Soldani and A. Brogi, "Anomaly Detection and Root Cause Analysis in Cloud and Microservice-Based Applications: A Survey," DOI:10.48550/arXiv.2105.12378

REFERENCES

1. Implementing Microservices on AWS. *Monitoring Microservices on AWS*, AWS Whitepaper, 2023. [Online]. Available: <https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/microservices-on-aws/monitoring.html>
2. A Model-driven Approach for Continuous Performance Engineering in Microservice-based Systems. URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.09999>
3. Monitoring tools for DevOps and microservices: A systematic grey literature review. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111906>
4. L. Desina, "Evaluating the Impact of Cloud-Native Microservices Architecture on Application Performance," *arXiv preprint arXiv:2305.15438*, 2023.
5. Jani, "Unified Monitoring for Microservices: Implementing Prometheus and Grafana for Scalable Solutions," *ResearchGate*, 2024. DOI:10.51219/JAIMLD/yash-jani/206
6. J. Soldani and A. Brogi, "Anomaly Detection and Root Cause Analysis in Cloud and Microservice-Based Applications: A Survey," DOI:10.48550/arXiv.2105.12378

Received 05.01.2026.
Accepted 09.01.2026.

**Research on the efficiency of implementing a microservice system
for monitoring users and resources on the AWS cloud platform**

The relevance of this study is driven by the need to improve the effectiveness of monitoring microservice-based systems in cloud environments for e-commerce, particularly on the AWS platform. This is achieved through a comparative analysis of implementations developed in different programming languages and an assessment of their suitability for use in high-load systems. Special attention is given to ensuring the stability and performance of system components, optimizing the utilization of computing and network resources, increasing the speed of user request processing, and improving the efficiency of resource management under dynamically changing load conditions. The paper considers key aspects of studying the effectiveness of the microservice system for monitoring users and resources of the AWS cloud platform, implemented using C# and Go. The results of performance and resource utilization between implementations in the C# and Go programming languages were analyzed to determine the feasibility of using each language in e-commerce systems with a cloud architecture. To reproduce a load close to real user behavior, a PHP script was developed. It provides parallel execution of HTTP requests and collection of service response statistics. A series of load tests were performed with a gradual increase in the number of simultaneous requests. The results obtained allow to analyze the use of processor resources, RAM, and service response time at different load levels. Comparison of average values showed a stable difference between implementations, which is confirmed by both tabular data and graphical monitoring results in the AWS EC2 environment. Additional analysis of long-term moderate load metrics showed that in the absence of significant differences in network traffic and the number of packets, the increased CPU utilization in the C# implementation is due to the peculiarities of code execution and the request processing model. Thus, the conducted study confirmed that the implementation of the metrics microservice on Go demonstrates lower computational resource consumption and shorter response time under the same load conditions, which justifies the feasibility of its use when building microservice monitoring systems in cloud environments.

Спирінцев В'ячеслав Васильович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0908-1180>

Спирінцева Ольга Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5050-5985>

Дубіна Єгор Сергійович – магістр, НТУ "Дніпровська політехніка".

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5693-1696>

Spiritsev Viacheslav Vasyliovych – candidate of technical sciences, ass.professor, associate professor of computer system's software department of the Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0908-1180>

Spiritseva Olga Volodymyrivna – candidate of technical sciences, ass. professor, associate professor of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5050-5985>

Dubina Yegor Serhiyovych – master, Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5693-1696>

**STUDY OF THE NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD
ALONG THE THICKNESS OF A MULTILAYER EXTERNAL WALL PANEL OF A
RESIDENTIAL BUILDING IN WINTER**

Abstract. Solved the relevant problem of studying the non-stationary temperature field along the thickness of a multilayer external wall panel of a residential building with daily fluctuations in ambient temperature in the winter period.

Key words: multilayer external wall panel, temperature field, non-stationary calculation, insulation of a residential building, enclosing structure.

Introduction. In winter, the problem of heating residential buildings and storing heat in them becomes relevant. The main problem is taking into account the daily change in ambient temperature, which requires non-stationary calculations of the temperature field of enclosing structures that have a multilayer structure. The study of the non-stationary temperature field and heat fluxes of multilayer wall panels of buildings will allow for the correct design of the geometric parameters of the layers of their external wall panels and the optimal selection of insulation materials. This direction is dedicated to the study of the problem of energy conservation – a relevant problem of modern times in Ukraine.

Analysis of recent research and publications. Residential, cultural, administrative and industrial buildings are large consumers of thermal energy. According to experts, up to 50% of energy consumed can be saved annually in the stock of residential and non-residential buildings through energy-saving measures. Considering the fact that heat loss through building envelopes accounts for up to 80% of all total heat losses [3], thermal calculation of building envelopes becomes relevant.

Calculating the temperature field in the enclosing parts of buildings is also relevant for the implementation of many factors, including:

- energy efficiency: thermal calculation allows you to determine the geometric parameters of enclosing structures and optimally select thermal insulation material, which leads to minimizing heat loss and, as a result, reducing heating costs;
- preventing destruction: the calculated temperature field prevents the formation of condensation and mold in the rooms, which can lead to the gradual destruction of structures;
- endurance: extending the endurance of building structures is possible by taking into account the heat resistance and strength of their materials, which is based on the calculation of the thermal field of enclosing structures;

– thermal protection and accordance with building codes: thermal calculation ensures accordance of enclosing structures with the requirements of modern building codes and regulations in terms of thermal protection and safety;

– comfort: maintaining optimal indoor temperatures without sudden changes is critically important for creating comfortable living or working conditions for people.

In work [4], a study of heat flows and an analysis of heat losses of opaque external enclosures of heated premises was conducted, taking into account various methods for assessing the heat-shielding properties of external walls: without taking into account heat-conducting inclusions (external walls in the heat engineering calculation are a homogeneous opaque enclosure); taking into account heat-conducting inclusions according to the standards in force in Ukraine and according to the European standard, as well as instrumental determination of the characteristics of thermal protection. It has been shown that taking into account heat-conducting inclusions, even for a building without complex structural solutions for enclosures, leads to an increase in heat loss of up to 14%, which may change the energy efficiency class of the building.

In paper [5], a simplified discrete analogue, presented in a dimensionless form, was developed for the numerical solution of unsteady heat transfer problems. This was achieved by using a one-dimensional initial model. The use of such a model is sufficient for solving most practically important problems. The stability of numerical calculations at large time discretization steps and high accuracy of calculations on extremely small computational grids are shown.

The article [6] is devoted to the study of unsteady heat conduction in a solid wall and contains mathematical modeling of asymmetric heating and cooling of the wall due to imperfect heat transfer from both sides. The method used to obtain an analytical solution in a long-time process is presented. The solution method allows to obtain the temperature distribution in the heated (cooled) wall using the Laplace transform. Its validity is verified by numerical calculation using the COMSOL Multiphysics software. In the example that was tested, the maximum difference between the analytical and numerical solutions was about 3.5%, taking into account the possible maximum and minimum temperatures in the wall under given conditions.

The thermal response of a building's envelope has a significant impact on the overall comfort conditions in the room, as well as on the energy efficiency of buildings. Most Central and Northern European countries focus mainly on optimizing the efficiency of buildings during the heating season. However, future projections show the potential for a significant increase in cooling demand due to building overheating. In this context, the focus of the paper [7] was on assessing the transient performance of different facade walls (light and heavy building systems) during typical Central European summer conditions. In addition to the influence of wall composition, the effects of orientation and high-intensity passive cooling on thermal response were also investigated. The results showed significant differences in the thermal behavior of east-, south-, and west-facing walls.

Thus, the review of recent studies shows that, despite the significant influence of many factors on the thermal state of building structures, the issue of conducting non-stationary thermal calculation of a multilayer enclosing structure remains relevant, especially in the winter period.

The purpose of the study: to investigate the non-stationary distribution of the temperature field along the thickness of a four-layer wall panel of a residential building depending on the daily change in ambient temperature in the winter period.

Presentation of the main material of the study. Calculated cases of the location of building materials in the layers of the wall panel and their coefficients of thermal conductivity are presented in the table 1.

Table 1

The location of building materials in the layers of the wall panel and their thermal conductivity coefficients λ , kcal/(m·h·grad)

	Wall panel layers			
Material of a layer	Concrete inner textured layer	Cement fibro-lite	Mineral wool plate	Concrete outer textured layer
Layer thickness, mm	80	70	55	40
Number of a layer	1	2	3	4
λ , kcal m·h·grad	1,400	0,130	0,060	1,400

The scheme of the arrangement of layers in a multilayer wall panel in relation to the interior and the environment is shown in Fig. 1.

Fig. 2 shows a graph of the temperature of a four-layer wall panel each layer depending on time, taking into account changes in ambient air temperature.

The non-stationary calculation of the temperature field in a four-layer flat wall, illustrated by the lines in Fig. 2, was obtained using the methodology that described in [3].

Analysis of the graph in Fig. 2 shows that lines 3-4 and 4 have a noticeable effect of decreasing ambient temperature (the lines have a clearly expressed temperature minimum). Lines 1-2 and 2-3 almost do not contain such minima, which indicates sufficient thermal insulation properties of layer 3 – mineral wool plate. The line 1, which models the temperature on the inner surface of a residential building, has an almost rectilinear shape and proves that comfortable temperature conditions inside the building by this model of the arrangement of layers in the wall panel are ensured.

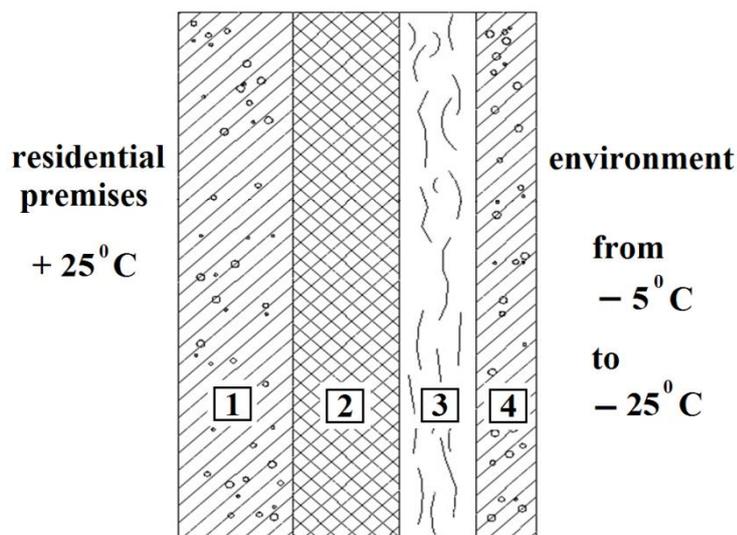


Figure 1 - Scheme of a multilayer external wall panel:
 1 – concrete inner textured layer; 2 – cement fibrolite;
 3 – mineral wool plate; 4 – concrete outer textured layer

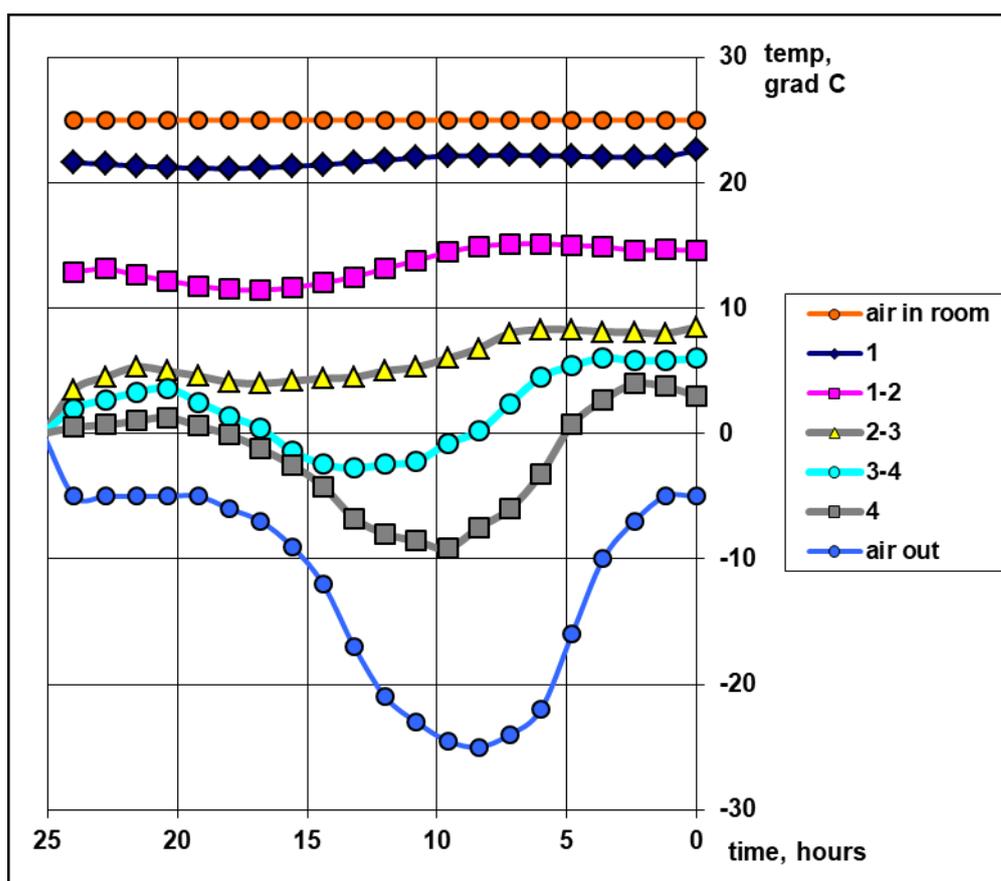


Figure 2 - Distribution of the temperature field along the thickness of a four-layer external wall panel depending on the ambient air temperature:
 air in room – indoor air; 1 – the inner surface of a wall indoors;
 1-2, 2-3, 3-4 – contact surfaces of layers 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4 respectively; 4 – outer surface of the outer layer; air out – ambient air

Analysis of calculations shows that the effect of low ambient air temperature on the temperature inside the room when it passes through a multilayer enclosing building structure can be reduced by one or both of two methods:

- firstly, by increasing the thickness of the thermal insulation layer;
- secondly, by choosing a thermal insulation material with the lowest possible thermal conductivity coefficient.

The presented results were tested at the 20th and 21st International Conferences “Man and Space” [1-2].

Conclusions. In the course of the task, the following types of work were carried out and the following conclusions were obtained:

- 1) the problem of heat saving and the need to use thermal insulation coatings are considered;
- 2) the methodology and basic principles of conducting non-stationary thermal calculations of a multilayer flat wall were studied;
- 3) non-stationary calculations of temperatures through a four-layer flat wall taking into account the daily change in ambient temperature in the winter period were carried out;
- 4) a graph of the temperature through thickness of the multilayer wall depending on time has been constructed, which allows determining the geometric parameters of each layer of the multilayer external flat wall of a residential building and optimally selecting the type of thermal insulation material;
- 5) ways to reduce the impact of daily fluctuations in air temperature in winter on indoor temperature are proposed.

LITERATURE

1. Кравець О.В. Тепловий захист поверхонь в нестационарних умовах / О.В. Кравець, К.В. Махоніна. – XXI Міжнародна наук.-практ. конф. „Людина і космос”. – Дніпро. – 10-12 квітня 2019. – С. 32.
2. Кравець О.В. Тепловий розрахунок багатошарової стінової панелі / О.В. Кравець, К.В. Махоніна. – XX Міжнародна наук.-практ. конф. „Людина і космос”. – Дніпро. – 11-13 квітня 2018. – С. 35.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
4. Шовкалюк М.М. Аналіз тепловтрат через огороження з урахуванням різних методів оцінки теплозахисних властивостей / М.М. Шовкалюк, С.В. Зіменко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 4. – С. 73-82; ISSN 2308-7382 (Online)
5. Brunetkin O. A Simplified Method for the Numerical Calculation of Nonstationary Heat Transfer Through a Flat Wall / O. Brunetkin, M. Maksymov, O. Lysiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – N. 2/5 (86). – 2017. – P. 4-13; DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96090.
6. Charvátová H. Mathematical Model of Non-stationary Heat Conduction in the Wall: Asymmetric Problem with the Boundary Conditions of Imperfect Heat Transfer / H. Charvátová, M. Zálešák // Journal MATEC Web of Conferences. – N. 76. – 2016. – P. 89-94; DOI: 10.1051/matecconf/2016760 2016 6.

7. Košir M. Non-stationary thermal performance evaluation of external façade walls under central European summer conditions / M. Košir, L. Pajek, B. Hudobivnik, M. Dovjak, N. Iglič, D. Božiček, R. Kunič // Journal of Solar World Congress. – N. 11. – 2017. – P. 11-22; DOI: 10.18086/swc.2017.15.03.

REFERENCES

1. Kravets O.V. Teplovyy zakhyst poverkhon' v nestatsionarnykh umovakh / O.V. Kravets, K.V. Makhonina. – XXI Mizhnarodna nauk.-prakt. konf. „Ludina i kosmos” – Dnipro. – 10-12 kvitnya 2019. – P. 32.
2. Kravets O.V. Teplovyy rozrakhunok bahatosharovoyi stinovoyi paneli / O.V. Kravets, K.V. Makhonina. – XX Mizhnarodna nauk.-prakt. konf. „Ludina i kosmos” – Dnipro. – 11-13 kvitnya 2018. – P. 35.
3. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdavshchikh chastey zdaniy / K.F. Fokin. – M.: Stroyizdat, 1973. – 287 p.
4. Shovkalyuk M.M. Analiz teplovtrat cherez ohorodzhennya z urakhuvannyam riznykh metodiv otsinky teplozakhysnykh vlastyvostey / M.M. Shovkalyuk, S.V. Zimenko // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. – 2017. – N 4. – P. 73-82; ISSN 2308-7382 (Online)
5. Brunetkin O. A Simplified Method for the Numerical Calculation of Nonstationary Heat Transfer Through a Flat Wall / O. Brunetkin, M. Maksymov, O. Lysiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – N. 2/5 (86). – 2017. – P. 4-13; DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96090.
6. Charvátová H. Mathematical Model of Non-stationary Heat Conduction in the Wall: Asymmetric Problem with the Boundary Conditions of Imperfect Heat Transfer / H. Charvátová, M. Zálešák // Journal MATEC Web of Conferences. – N. 76. – 2016. – P. 89-94; DOI: 10.1051/mateconf/2016760 2016 6.
7. Košir M. Non-stationary thermal performance evaluation of external façade walls under central European summer conditions / M. Košir, L. Pajek, B. Hudobivnik, M. Dovjak, N. Iglič, D. Božiček, R. Kunič // Journal of Solar World Congress. – N. 11. – 2017. – P. 11-22; DOI: 10.18086/swc.2017.15.03.

Received 06.01.2026.
Accepted 13.01.2026.

Дослідження нестационарного поля температури за товщиною багатощарової зовнішньої стінової панелі житлового будинку в зимовий період

На сучасному етапі розвитку енергетики, в умовах енергетичної кризи на перший план виходить розробка та впровадження енергозберігаючих технологій, які зменшують споживання енергоносіїв, знижуючи, тим самим, шкідливі викиди в атмосферу. Одним зі шляхів втілення в життя цього напрямку є теплозбереження – комплекс заходів, спрямованих на зменшення втрат тепла з приміщень, що веде до зниження витрат на опалення та підвищує комфорт. Теплова реакція огорожувальних конструкцій будівлі має суттєвий вплив на формування загальних умов комфорту в приміщенні, а також на енергетичну ефективність будівель. Особливо актуальним стає питання при великому перепаді температур повітря всередині приміщення та в навколишньому

середовищі зовні, тобто в зимовий період. Одним зі шляхів розв'язання цієї проблеми стає вибір матеріалів та геометричних параметрів прошарків багатошарових огороджувальних стінових панелей приміщень. Робота присвячена дослідженню нестационарному розподілу поля температури за товщиною чотиришарової зовнішньої огороджувальної стінової панелі житлового будинку в зимовий період при добовому коливанні температури навколишнього повітря від -5°C до -25°C . В якості матеріалів шарів стінової панелі досліджено: бетонний внутрішній фактурний шар, фіброліт цементний, мінераловатна плита, а також бетонний зовнішній фактурний шар. Метою роботи є визначення впливу добового коливання температури повітря зовнішнього середовища на розподіл температур шарів чотиришарової стінової панелі. В процесі виконання поставленої задачі було проведено нестационарні розрахунки температур крізь чотиришарову плоску стінку з урахуванням добової зміни температури навколишнього середовища у зимовий період; побудовано графік залежності температури за товщиною багатошарової стінки від часу, що дозволяє визначити геометричні параметри кожного шару багатошарової зовнішньої плоскої стінки житлового будинку та оптимально підібрати різновид теплоізоляційного матеріалу; запропоновано шляхи зменшення впливу добового коливання температури повітря навколишнього середовища в зимовий період на температуру всередині приміщення при проходженні його крізь багатошарову огороджувальну будівельну конструкцію.

Кравець Олена Володимирівна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет ім. Олесея Гончара.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3428-2232>

Махоніна Карина Володимирівна – магістр, кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олесея Гончара.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8666-9556>

Kravets Olena Volodymyrivna – candidate of physical and mathematical sciences, docent, docent of the Department of AeroHydro Mechanics and Energy and Mass Transfer, Oles Honchar Dnipro National University.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3428-2232>

Makhonina Karina Volodymyrivna – master, Department of AeroHydro Mechanics and Energy and Mass Transfer, Oles Honchar Dnipro National University.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8666-9556>

HARMONIC INDUCTOR-TO-FREQUENCY CONVERTER BASED ON IMPEDANCE CONVERTER

Abstract. Objective - increased sensitivity of F-metrically inductance converter. Found management conditions Slope conversion measuring generator based on a combination of the operating circuit by varying the parametric elementary sensor inductance compensation included in the oscillator, resonant circuit.

Keywords: inductance, resistance, impedance, sensor, generator, combined operating circuit, frequency increment, compensation, sensitivity, F-meter.

Introduction. In modern devices, measurement and control method is widely used F-meters, allowing relatively easy to convert the reactans sensor frequency harmonic oscillations [1]. The disadvantage of this method is its limited sensitivity to a change in the controlled parameter. So, urgent is the establishment of tools to increase the sensitivity of the method of control F-meters.

In [2,3] laid the foundations for the synthesis of impedance converters on operational amplifiers. Conclusions [4] indicate the usefulness of the combination of the operating circuit to create a measuring generator with controlled sensitivity.

Formulation of the problem. The aim is to develop F-meter sensitive to changes in the parametric sensor inductance.

Main part. Measuring generator based on a linear combination of the operating circuit (LCOC) is shown in Fig. 1. The linear combination of the operating diagram with inductive impedance in the negative feedback loop is the presence of a characteristic combination of feedback, and the fact that the external drive signals U_1 and U_2 received in phase to both woos da operational amplifier DA2. From the findings of the work [4], the input impedance is LCOC

$$\dot{Z}_{in} = (\dot{Z}_1 - R_2 R_3 / \dot{Z}_4) / (1 - n), \quad (1)$$

where $\dot{Z}_1 = r_1 + j\omega L_1$ - integrated inductor L_1 impedance and internal resistance of r_1 ; R_2, R_3 - the active resistance of the circuit combined feedback amplifier DA2; $\dot{Z}_4 = R_4 / (1 + j\omega C_4 R_4)$ - complex impedance parallel-connected resistance R_4 and capacity C_4 ; $n = U_2 / U_1$, U_1 and U_2 - driving voltage signals. Repeater on DA1 amplifier with a resistive divider R_A, R_B is a source of excitation voltage U_2 , U_1 - phase input voltage. The ratio of the stress field can be represented by the ratio of the divider resistors in the form of

$$n = R_B / (R_A + R_B), \quad (2)$$

while the input impedance expressed by the parameters of the scheme will be

$$\dot{Z}_{in} = (1 + R_B/R_A)(r_1 + j\omega L_1 - R_2 R_3/R_4 - j\omega C_4 R_2 R_3). \quad (3)$$

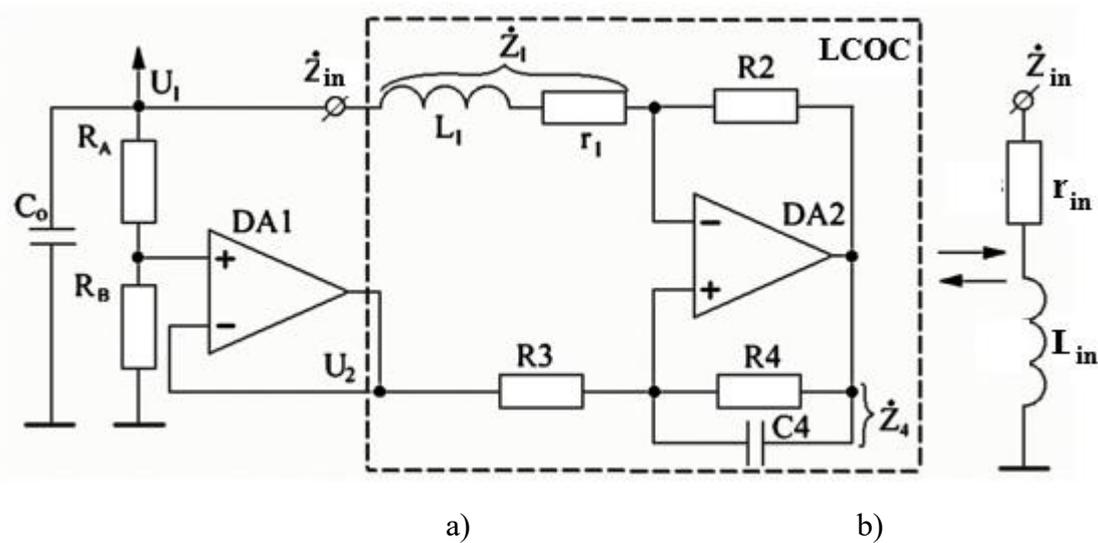


Figure 1 - Measuring LCOC generator based on (a);
LCOC equivalent representation (b)

It is also true that represented by the input parameters is

$$\dot{Z}_{in} = r_{in} + j\omega L_{in}, \quad (4)$$

where r_{in} , L_{in} - input resistance and inductance. Then (3) and (4) the expression of active and inductive component input impedance

$$r_{in} = (1 + R_B/R_A)(r_1 - R_2 R_3/R_4), \quad (5)$$

$$L_{in} = (1 + R_B/R_A)(L_1 - C_4 R_2 R_3), \quad (6)$$

showing that in this scheme, L_1 inductance and internal resistance r_1 is converted into the input inductance L_{in} and resistance r_{in} with the multiplication factor equal to

$$m = (1 + R_B/R_A), \quad (7)$$

which, when $R_B \gg R_A$, can take larger values. From (5) it follows that multiplication resistance r_1 is accompanied by compensation negative active component of the input impedance equal LCOC

$$R_{(-)} = -R_2 R_3/R_4, \quad (8)$$

$|R_{(-)}| \rightarrow r_1$ at the input resistance $r_{ex} \rightarrow 0$, which indicates the possibility of a significant increase in the quality factor inductance.

From (6) it follows that multiplication by m inductance L_1 ratio occurs simultaneously with a decrease in its initial value by $C_4 R_2 R_3$, which will be called the compensating inductance L_k . Expression (6) in the form

$$L_{in} = m(L_1 - L_K). \quad (9)$$

Suppose that under the influence of a controlled parameter of the inductance L_1 of the sensor changes by, the ΔL_1 input inductance becomes LCOC

$$L_{in} + \Delta L_{in} = m(L_1 + \Delta L_1 - L_K). \quad (10)$$

From (9), (10) it follows that the absolute and relative increment of the input inductance up

$$\Delta L_{in} = m\Delta L_1, \quad (11)$$

$$\Delta L_{in}/L_{in} = \Delta L_1/(L_1 - L_K), \quad (12)$$

and, when $L_K \rightarrow L_1, \Delta L_{in}/L_{in} \rightarrow \infty$. It can be seen that the absolute increment of the input inductance is determined by multiplying the coefficient m , and the relative increase - the value of the compensating inductance L_K . This shows that the possible scaling ЛКОС inductance sensor with control values of sensitivity to the monitored parameters.

To the input capacitance connected LCOC C_O , which with the input inductance L_{in} forms an oscillating circuit with a resonance frequency

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{in}C_O}}. \quad (13)$$

From (5) it follows that if the condition $r_1 < R_2R_3/R_4$ in the circuit there is a negative resistive component of the input impedance LCOC to compensate ohmic losses in the circuit and provides a stationary harmonic oscillations at the resonant frequency (13), which, subject to (9) is vie

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{m(L_1 - L_K)C_O}}. \quad (14)$$

If you change the sensor inductance L_1 frequency increment can be defined as

$$\Delta f = \frac{df}{dL_{in}} \Delta L_{in} = - \frac{1}{4\pi\sqrt{m(L_1 - L_K)C_O}} \cdot \frac{\Delta L_1}{(L_1 - L_K)}. \quad (15)$$

From (15) we see that the frequency increment is substantially increased when $L_K \rightarrow L_1$. The latter justifies the possibility of increasing the sensitivity of F-meters based on LCOC to L_1 inductance change parametric sensor.

Experimental verification of the expressions (14) and (15) was carried out on the measuring generator (Fig.1), assembled on operational amplifiers ICL7650 with inductance $L_1 = 21$ mH, capacitance $C_O = 1,106$ μ F and an initial rate of 460 Hz. Fig. 2 shows the experimental module increments Δf frequency generator of incremental inductance ΔL_1 sensor by varying the values of the compensating inductance L_K from 0 to 17.23 mH.

Experimental data show that, depending $\Delta f(\Delta L_1)$ linear; while compensating inductance $L_K = 0$ (curve 5) sensitivity to ΔL_1 minimum and 7.5 Hz/mH, while increasing the value increases the sensitivity L_K (depending 1 - 4), so when $L_K = 17.23$ mH (1 relationship) increases the sensitivity of five times to 39.2 Hz/mH. This confirms that the magnitude of the compensating inductance L_K , relative to the initial inductance L_1 sensor can be controlled oscillator sensitivity measuring conditions within $L_1 - L_K > 0$.

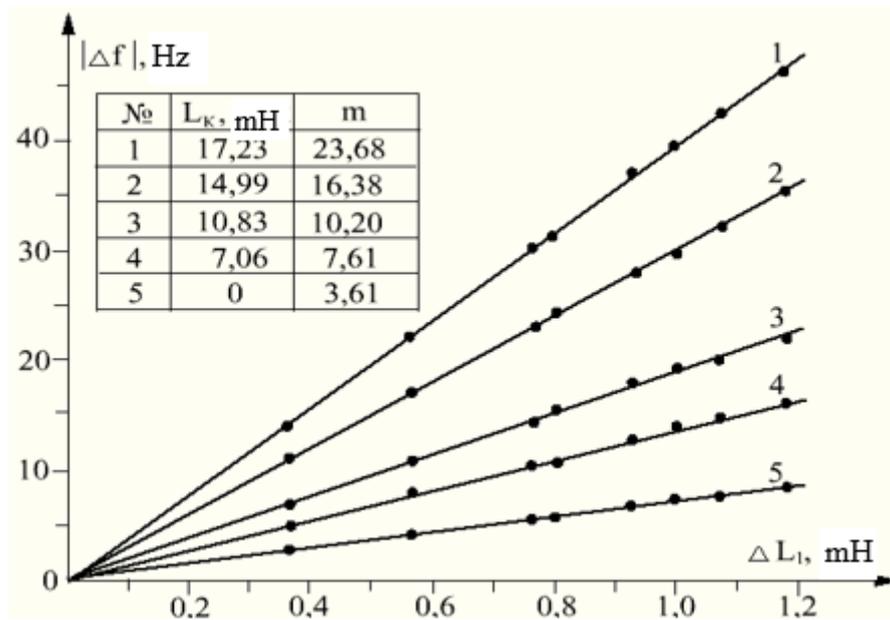


Figure 2 – Increment frequency generator as a function of Δf L_1 inductance sensor for different values compensating inductance L_K

Experimental family conversion features (Fig. 3) changing the compensating inductance from 0 (relation 5) to 17.23 mH (1 relationship) also support an increase in the steepness of the conversion characteristics when $L_K \rightarrow L_1$.

Calculated according to (14) and (15) are in good agreement with the experimental data, the difference (due to nonidea sectional amplifiers and precision measuring devices) are not pre-exceeds 5%.

Conclusion. Studies measuring the generator on the basis of a linear combination of the operating circuit showed after-blowing:

- compensation for sensor initial inductance while multiplying its increments allow you to manage the change, you often measuring oscillator;
- changing the frequency measuring generator sous-substantially determined by the value of the compensating inductance;
- the use of measuring generator based on linear combinate operating schemes can increase the sensitivity of F-meters to a change in inductance of the parametric transducer.

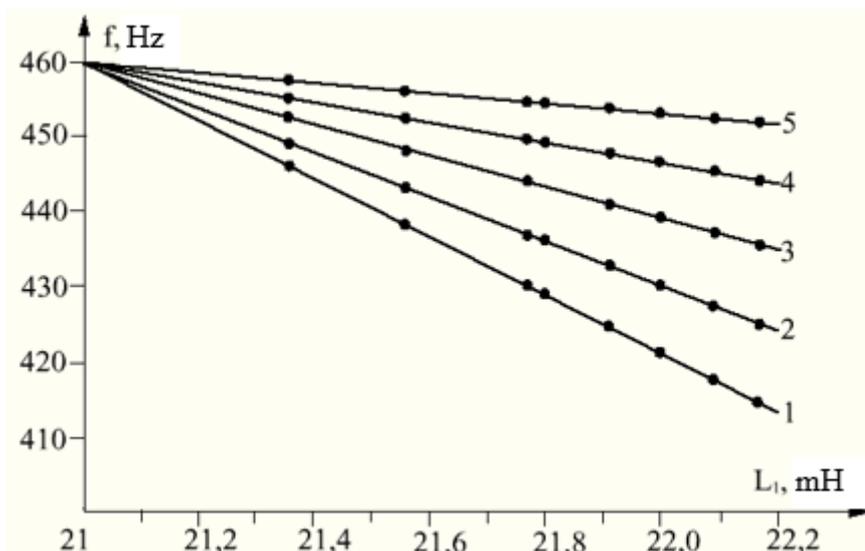


Figure 3 - Characteristics of the measuring conversion generator

REFERENCES

1. Izmereniya v elektronike: Spravochnik / Kuznetsov V.A. i dr. Pod red. V.A. Kuznetsova. – M. : Energoatomizdat, 1987. – 512 s.
2. Filanovskii I.M., Persianov A.Yu., Ribin V.K. Skhemy s preobrazovatelyami soprotivleniia. – L. : Energiia, 1973. – 192 s.
3. Marshe Zh. Operatsionnye usiliteli i ikh primenenie – L. : Energiia, 1974. – 216 s.
4. Tverdostup N.I. Obobshchennaya model preobrazovatelei impedansa. *Visnyk Dnipropetr. un-tu. Fizyka. Radioelektronika.* – 2010 – vyp. 17, №2. S.103 – 108.

ЛІТЕРАТУРА

1. Измерения в электронике: Справочник / Кузнецов В.А. и др. Под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.
2. Филановский И.М., Персианов А.Ю., Рыбин В.К. Схемы с преобразователями сопротивления. – Л.: Энергия, 1973. – 192 с.
3. Марше Ж. Операционные усилители и их применение – Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
4. Твердоступ Н.И. Обобщенная модель преобразователей импеданса. *Вісник Дніпропетр. ун-ту. Фізика. Радіоелектроніка.* – 2010. – Вип. 17, №2. С. 103 - 108.

Received 06.01.2026.
Accepted 14.01.2026.

Гармонійний перетворювач індуктивності в частоту на основі конвертора імпедансу

Недоліком F-метра, як вимірювальної системи, є невисока чутливість до варіації індуктивності параметричного давача. Для підвищення чутливості проведено аналіз гармонійного генератора, який містить коливальний LC – контур, під'єднаний до конвертора імпедансу, вхідний опір якого має від'ємні активну і індуктивну складові. Від'ємна активна складова, при певних умовах, забезпечує виникнення гармонійних коливань, від'ємна індуктивна складова компенсує необхідну частину індуктивності параметричного давача. Теоретично показано і експериментально підтверджено, що

компенсація певної частини індуктивності давача з одночасним множенням її приросту дає можливість керувати зміною частоти коливань вимірювального генератора. Чутливість зміни частоти вимірювального генератора суттєво залежить від величини компенсуючої індуктивності. Використання вимірювального генератора на основі конвертора імпедансу дає можливість збільшити чутливість F – метра до варіації індуктивності параметричного давача.

Твердоступ Микола Іванович – доцент, к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2571-634X>

Tverdostup Mykola Ivanovych – Associate Professor of Computer Systems Engineering Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2444-7925>

ARCHITECTURE OF A SECURE CRYPTOCURRENCY WALLET BASED ON AIR-GAP AND MULTISIGNATURE MECHANISMS

Abstract. The study addresses the vulnerabilities of cryptocurrency wallets to network attacks. A secure cross-platform architecture is proposed, integrating Air-Gap, PSBT, and M-of-N multisignature mechanisms. The solution implements isolated online and offline modules with transaction data exchange via QR codes. Results demonstrate that this architectural approach effectively ensures private key isolation and enhances the security of digital asset transactions.

Keywords: cryptocurrency wallet, Air-Gap, cold storage, multisignature, PSBT, QR code, blockchain, offline signing, cross-platform application.

Problem statement. The rapid growth in cryptocurrency transaction volumes has intensified the focus on secure asset storage and protection mechanisms. Cryptocurrency wallets constitute a fundamental component of blockchain infrastructure, enabling user interaction with decentralized networks. However, they also represent a critical vulnerability within this ecosystem. Unlike traditional financial systems, where security is enforced by centralized regulatory entities, decentralized architectures transfer full responsibility for asset protection to individual users.

Cryptocurrency wallets are generally classified into two categories: hot wallets and cold wallets, distinguished primarily by their connectivity to the Internet and corresponding security characteristics. Hot wallets operate on devices with continuous network access, offering high usability for routine transactions. This category encompasses software solutions such as Trust Wallet and MetaMask, as well as mobile and web applications provided by cryptocurrency exchanges. Nevertheless, persistent connectivity significantly increases exposure to cyber threats. Common attack vectors include phishing, malware (e.g., spyware and clipboard hijackers), and exploitation of zero-day vulnerabilities in operating systems such as Android, iOS, and Windows. According to Chainalysis, a substantial proportion of cryptocurrency asset losses result from compromises of hot wallets through browser extensions and mobile platforms [1].

Conversely, cold wallets are designed to maintain complete isolation from online environments, prioritizing maximum security. This class includes paper wallets and hardware wallets. Paper wallets provide full offline storage but are susceptible to physical damage, loss, or destruction, rendering them impractical for frequent use.

Hardware wallets, exemplified by Ledger and Trezor, secure private keys within dedicated hardware modules, thereby mitigating remote compromise risks. However, these devices exhibit functional limitations and remain vulnerable to specific threats, including supply chain attacks, partial opacity of source code, and risks associated with physical connectivity via USB, Bluetooth, or NFC, which introduce additional attack surfaces.

To increase the security of transactions in the blockchain, a multi-signature mechanism is used, which requires several independent signatures to confirm the operation. Instead of a single private key, the M-of-N rule is used, where N is the total number of owners and M is the minimum number of signatures required to complete a transaction. This approach prevents unauthorized access, as compromising a single key does not allow the transaction to be completed. In the Bitcoin blockchain, multi-signature is implemented through scripts (e.g., P2WSH) and the BIP-174 Partially Signed Bitcoin Transaction (PSBT) format [2], and in the Ethereum blockchain, through smart contracts such as Safe with threshold and permission logic [3].

A common cybersecurity practice to protect critical data, such as private cryptographic keys or confidential transactions, is the use of air-gapped devices. These are computers or hardware systems that are physically isolated from any network connections, including the Internet, local networks, and wireless interfaces. Such isolation means that the device has no active network ports or radio channels, making it inaccessible to remote attacks. Interaction with such devices is carried out via offline data transfer methods, such as QR codes or USB media, which allows you to maintain isolation and minimize the risks of compromise.

Thus, it is relevant to consider a combination of several technologies for ensuring the security of cryptocurrency wallets.

Analysis of the latest research and publications. The security of cryptocurrency wallets remains a key topic of current research. The paper by Guri et al. [4] addresses the problem of private key leakage even from isolated (air-gapped) systems. The authors demonstrate the possibility of attacks through side channels (electromagnetic, acoustic), which calls into question the absolute security of offline devices.

The study by Homoliak et al. [5] proposes the concept of SmartOTPs, a two-factor authentication mechanism for smart contracts that uses QR codes and hash chains to transmit signatures offline. This solution increases the security of transactions without losing convenience.

Another important direction is the standardization of the transaction signing process. Homoliak et al. (2024) review modern approaches to multi-signature and PSBT, which allow for collective control of assets [6]. CertiK [7] analyzes PSBT vulnerabilities in DeFi projects and offers recommendations for secure implementation, including SIGHASH verification and avoiding UTXO dust.

The study by Das et al. [8] focuses on threshold signatures, which provide compactness and efficiency for multi-party protocols. This is especially relevant for cold wallets, where minimizing the risk of compromise is important.

Special attention is paid to hardware wallets. Dabrowski et al. [9] showed architectural shortcomings of popular solutions (Ledger, Trezor), in particular supply chain risks. Šorf et

al. [10] performed a large-scale analysis of 17 hardware wallet models, revealing implementation problems, although the cryptographic algorithms remain robust.

Comparative studies (Haryadi et al. [11], Lim et al. [12]) demonstrate a trade-off between the convenience of hot wallets and the security of cold wallets. Hybrid solutions are considered a promising direction that combines the advantages of both approaches.

In general, current work emphasizes the need for a comprehensive approach: a combination of Air-Gap, multi-signature, PSBT and cryptographic protection of local data to create secure and convenient cryptocurrency wallets.

Purpose of the research. The aim of the research is to develop an architecture and create a cross-platform cryptocurrency wallet that provides:

- 1) physical isolation of private keys (Air-Gap) during the signing process;
- 2) use of the PSBT standard for secure data exchange between online and offline modules;
- 3) integration of the QR process for transferring transaction data between isolated environments, which eliminates direct network connection and increases resistance to attacks;
- 4) implementation of a multi-signature mechanism for collective control of assets;
- 5) use of cryptographic algorithms to protect the local database.

Presentation of the main research material. When developing a cross-platform wallet application, cold storage technologies, air-gapped devices, data transfer using QR codes and multi-signatures are combined in a single architecture.

To achieve maximum security, the wallet is divided into two physical modules: the online Watcher module and the offline Signer module.

In addition, the system is structured according to the principle of a three-level architecture: Core, Transport, UI.

The Core level includes cryptographic primitives, key management and multi-signature logic. The Transport level implements Air-Gap, PSBT exchange between modules via QR codes. The UI interface level is responsible for transaction management, address book and credential verification (Fig. 1).

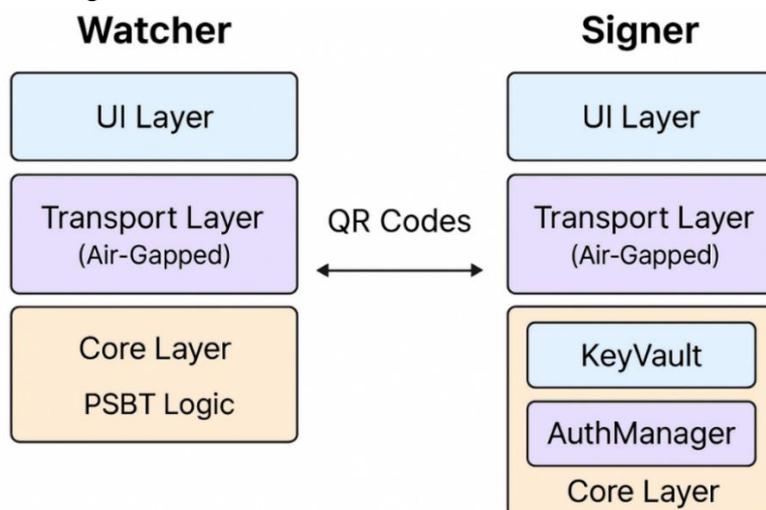


Figure 1 - Architecture of a two-module wallet with a three-tier structure

The online Watcher module is installed on the user's main smartphone with network access. It connects to blockchains (Bitcoin, Ethereum) to obtain balances and transaction history. It stores only the extended public key (xPub), which allows generating all wallet addresses for receiving funds, but does not allow spending them. It forms the initial transaction structure (UTXO for BTC, Nonce for ETH) and visualizes it in the form of a QR code. It accepts the signed transaction from the offline module and sends it to the blockchain network.

The offline Signer module is installed on an isolated device (without a SIM card, Wi-Fi and Bluetooth). It generates the Seed phrase and private keys, encrypts them and stores them in the database. Then, it reads the QR code from the Watcher module, checks the user's parameters and applies a digital signature in an isolated environment.

The wallet initialization process is critical and occurs exclusively in the offline Signer module. A cryptographically stable random number generator (CSPRNG) is used to generate a 256-bit sequence. A checksum is added to it, after which the data is divided into groups of 11 bits. Each group corresponds to a word from the BIP-39 dictionary, which results in a 24-word seed phrase that is used to restore the wallet. The seed phrase is converted to 512-bit binary data (seed) using the PBKDF2 function with 2048 iterations of HMAC-SHA512. According to the BIP-44 standard, a hierarchical derivation structure is used, which determines the order of key and address generation [14]. This approach allows one wallet to manage multiple cryptocurrencies (Bitcoin, Ethereum) and different types of addresses.

Key storage is implemented using the built-in SQLite database, while encryption is used to protect confidential information, where the user's password serves as the basis for generating the encryption key. The PBKDF2 function is used to convert the password to a 256-bit AES key, and all data in the keys table, including the seed phrase and private keys, are encrypted using the AES-256-CBC algorithm before being written to the database. This approach guarantees that even in the event of theft of the device and gaining access to the file system, the attacker will not be able to read the keys without knowing the password.

The algorithm for working with a multi-signature wallet via the Air-gap interface consists of the following stages.

First, in the Watcher module, the user forms a transaction, specifying the recipient's address and the amount. The application receives current data from the blockchain, creates a PSBT package and displays it as a QR code.

Next, each of the M signature participants opens the Signer module on their offline device and scans this code. After that, Signer module decrypts the transaction, shows the details ("Sending 1.0 BTC to bc1q... Fee: 0.0005 BTC"), and the user physically verifies the information. For authorization, a password is entered, based on which the private key is decrypted. Then the module digitally signs the transaction, clears the memory and generates a new QR code with a partially signed transaction.

Watcher module sequentially scans all signed codes from M offline modules, checks their validity and forms the final PSBT with the M-of-N threshold. When the number of signatures reaches the threshold, the transaction becomes valid and is broadcast to the blockchain network.

The client-level implementation of the wallet modules is made using modern cross-platform technologies. The mobile interface is built on Vue.js in combination with the Quasar Framework, which provides adaptive design and component architecture. Apache Cordova is utilized to access the device's hardware capabilities, such as the camera and file storage, by integrating native APIs into the web application.

The desktop implementation is based on Electron, enabling the application to run as a native app on Windows, macOS, and Linux while maintaining a unified codebase. In parallel, the Progressive Web App (PWA) mode is supported for working in a browser with offline caching and push notifications.

Specialized libraries are used to work with blockchains:

- bitcoinjs-lib — for generating and processing PSBT, generating keys, signatures and working with the UTXO model.
- ethers.js — for interacting with Ethereum-compatible networks, including generating transactions, calculating EIP-712 hashes, verifying signatures and calling smart contracts.

Conclusions. The proposed two-module architecture ensures private key isolation within an offline environment, eliminating network-based compromise risks. By integrating Air-Gap, PSBT, and M-of-N multisignature with robust AES-256 encryption, the system achieves high security without sacrificing usability. The cross-platform implementation provides a unified user experience across mobile and desktop devices. Ultimately, the developed solution effectively balances hardware-level protection, cryptographic transparency, and functional accessibility.

REFERENCES

1. Chainalysis. (2025). 2025 Crypto Crime Mid-Year Update. Retrieved January 8, 2026, from <https://www.chainalysis.com/blog/2025-crypto-crime-mid-year-update/>
2. Bitcoin Improvement Proposal 174 (BIP-174): Partially Signed Bitcoin Transaction Format. Retrieved January 8, 2026, from <https://bips.dev/174/>
3. Safe Foundation. (n.d.). Safe {Core}: Contracts Architecture. Retrieved January 8, 2026, from https://docs.safe.global/docs/contracts_architecture/
4. Guri, M. (2018). BeatCoin: Leaking Private Keys from Air-Gapped Cryptocurrency Wallets. arXiv. Retrieved January 8, 2026, from <https://arxiv.org/pdf/1804.08714>
5. Homoliak, I., Breitenbacher, D., Hujnak, O., Hartel, P., Binder, A., & Szalachowski, P. (2018). SmartOTPs: An Air-Gapped 2-Factor Authentication for Smart-Contract Wallets (Extended version). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.03598>
6. Homoliak, I., & Perešini, M. (2024). SoK: Cryptocurrency Wallets – A Security Review and Classification based on Authentication Factors. In 2024 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC). <https://doi.org/10.1109/ICBC59979.2024.10634439>
7. CertiK. (2024, December 17). Exploring PSBT in Bitcoin DeFi: Security Best Practices. CertiK Blog. Retrieved January 8, 2026, from <https://www.certik.com/resources/blog/exploring-psbt-in-bitcoin-defi-security-best-practices>
8. Das, S., Camacho, P., Xiang, Z., Nieto, J., Bünz, B., & Ren, L. (2023). Threshold signatures from inner product argument: Succinct, weighted, and multi-threshold. In Proceedings 122

- of the 2023 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '23) (pp. 356–370). <https://doi.org/10.1145/3576915.3623096>
9. Dabrowski, A., Pfefer, K., Reichel, M., Mai, A., Weippl, E. R., & Franz, M. (2021). Better keep cash in your boots – Hardware wallets are the new single point of failure. In Proceedings of the 2021 ACM CCS Workshop on Decentralized Finance and Security (DeFi '21) (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1145/3464967.3488588>
10. Šorf, M., Švenda, P., & Chmielewski, Ł. (2025). Large-scale security analysis of hardware wallets. In Lecture Notes in Computer Science (Vol. 15995, pp. 360–377). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00633-2_21
11. Haryadi, G. A., Rahaman, M. F., Subhan, M. R., Lee, J. M., & Kim, D.-S. (2022). Comparative study of cryptocurrency wallet security: A hybrid, hot, and cold wallet approach. ResearchGate. Retrieved January 8, 2026, from https://www.researchgate.net/publication/375187201_Comparative_Study_of_Cryptocurrency_Wallet_Security_A_Hybrid_Hot_and_Cold_Wallet_Approach
12. Lim, H.-J., Lee, S., Kim, M., & Lee, W. (2025). Comparative analysis of security features and risks in digital asset wallets. Electronics, 14(12), 2436. <https://doi.org/10.3390/electronics14122436>
13. National Institute of Standards and Technology. (2001). FIPS 197: Advanced Encryption Standard (AES). <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.197-upd1>
14. Bitcoin Improvement Proposal 44 (BIP-44): Multi-Account Hierarchy for Deterministic Wallets. Retrieved January 8, 2026, from <https://bips.dev/44/>

Received 09.01.2026.
Accepted 15.01.2026.

Архітектура безпечного криптогаманця на основі механізмів

Air-Gar та мультипідпису

Сучасний стан кібербезпеки в галузі цифрових активів свідчить про критичну вразливість гаманців до мережесих атак та шпигунського ПЗ. Наукові розробки підтверджують, що навіть ізольовані системи можуть бути скомпрометовані через побічні канали, що вимагає впровадження багаторівневих методів захисту. Актуальними напрямками досліджень є використання стандарту PSBT для уніфікації передачі даних та протоколів мультипідпису для усунення єдиної точки відмови. Аналіз існуючих апаратних рішень вказує на ризики закритих архітектур, що робить затребуваним створення відкритих систем із фізичною ізоляцією ключів.

Метою роботи є проектування та реалізація архітектури кросплатформного криптогаманця, що поєднує метод Air-Gar для фізичної ізоляції приватних ключів, стандарт PSBT для безпечного обміну даними та механізм мультипідпису M-of-N для колективного управління активами.

Запропонована архітектура базується на розділенні системи на два функціональні модулі: онлайн-модуль Watcher та офлайн-модуль Signer. Модуль Watcher відповідає за моніторинг блокчейну та формування транзакцій, зберігаючи лише публічні ключі. Модуль Signer функціонує на пристрої без мережесих інтерфейсів, забезпечуючи генерацію та зберігання приватних ключів у зашифрованій базі даних SQLite. Взаємодія між модулями здійснюється через візуальний інтерфейс QR-кодів,

що виключає прямий цифровий контакт між середовищами. Програмна реалізація виконана на стеку Vue.js та Quasar, що разом із Cordova та Electron забезпечує роботу застосунку на Android, iOS, Windows та Linux з єдиною кодовою базою.

Розроблена дворівнева архітектура ефективно ізолює приватні ключі від мережових загроз, забезпечуючи високу стійкість до віддалених атак. Використання стандартів PSBT та мультипідпису гарантує прозорість транзакцій та можливість колективного контролю над коштами. Кросплатформний підхід дозволяє масштабувати рішення на різні типи пристроїв, зберігаючи баланс між безкомпромісною безпекою та зручністю для кінцевого користувача.

Пономарьов Ігор Володимирович – к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин факультету фізики, електроніки та комп’ютерних систем Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7139-2885>

Ponomarev Igor Volodimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of the department of electronic computers of the faculty of physics electronics and computer systems of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7139-2885>

В.С. Хандецький, Г.В. Полухін, І.А. Скуратовський

КОНВЕЄРНА ПЕРЕДАЧА БЛОКІВ ФРЕЙМІВ В ЗАШУМЛЕНИХ КАНАЛАХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Анотація. Визначено залежність загальної кількості переданих фреймів n від об'єму додатку, довжини вікна і імовірності його успішної передачі. При невеликому рівні помилок $BER=5 \cdot 10^{-7}$ і використанні вікна з $n=40$ кількість пошкоджених фреймів не перевищує 20%. При $BER=10^{-6}$ ця кількість дорівнює 40% і частина з них увійде до складу третього вікна. Щоб уникнути суттєвого зменшення смуги пропускання, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER=5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, передача фреймів, ковзне вікно, завади, бітові помилки.

Введення. Протоколи з очікуванням, в яких відправник посилає окремий фрейм і після чого очікує підтвердження від одержувача про успішний прийом цього фрейму є найбільш завадостійкими, але, у той же час, задають нижню межу швидкості передачі інформації в комп'ютерних мережах. Підвищення швидкодії досягається при використанні двонаправлених протоколів ковзного вікна.

В будь-який момент часу відправник працює з визначеним набором порядкових номерів фреймів, які йому дозволено посилати (вони попадають у вікно, що надсилається). Одержувач працює з приймаючим вікном, що містить фрейми, які йому дозволено прийняти. Ці вікна не обов'язково мають бути однаковими. В одних протоколах розміри вікон фіксуються, в інших вони можуть змінюватись в процесі передачі фреймів [1]. Вимога доставки фреймів мережевому рівню приймаючого вузла в тому ж порядку, в якому вони були одержані від мережевого рівня вузла, що передає, зберігається.

Вікно постійно містить перелік ще непідтверджених фреймів. Збільшення загальної швидкості передачі тут ґрунтується на тому, що навіть при затримці деяких підтверджень передача фреймів продовжується, з надією на те, що через деякий час ситуація зміниться і підтвердження навпаки будуть поступати з більшою швидкістю. Практична статистика виправдовує такі сподівання. Така технологія, коли в процесі передачі знаходиться визначена кількість фреймів, називається конвеєрною обробкою.

Так як фрейми, що знаходяться у вікні відправника можуть бути пошкоджені завадами в процесі передачі, то відправник повинен зберігати їх копії в пам'яті на випадок можливої повторної передачі.

При передаванні фреймів по ненадійному каналу (з завадами) виникає ряд серйозних проблем [2]. Коли пошкодження фрейму відбувається всередині вікна, копія пошкодженого фрейму може поступити одержувачу пізніше, чим надійде один чи декілька фреймів, що розташовані безпосередньо за пошкодженим. Але ж каналний рівень одержувача повинен передавати фрейми мережевому рівню в послідовному порядку. Тому на приймаючій стороні повинна використовуватись буферна пам'ять, кількість комірок в якій перевищує кількість фреймів у вікні, а також застосовуватись механізм сортування.

Найбільш часто на практиці застосовуються два базових підходи до виправлення помилок при конвеєрній обробці.

Перший спосіб називається поверненням на n . Він полягає в ігноруванні усіх фреймів, які передаються за помилковим. Для цих фреймів підтвердження не посилається. Якщо вікно відправника заповниться раніше, чим закінчиться час очікування підтвердження, конвеєр починає простоювати. Коли ж закінчиться час очікування у відправника, він почне передавати повторно відразу ж усі фрейми, які не одержали підтвердження, починаючи з пошкодженого фрейму. Такий підхід при значній інтенсивності завад приводить до втрати значної частини пропускну здатності каналу. При збільшенні вікна одержувача принципових змін тут не відбувається.

Інша загальна стратегія обробки помилок при конвеєрній передачі фреймів називається вибірковою повтором [3]. Вона полягає в тому, що одержувач зберігає в буферній пам'яті усі вірні фрейми, одержані ним після пошкодженого фрейму. При цьому пошкоджений фрейм відкидається. Після закінчення часу очікування підтвердження відправник відправляє копію тільки самого старого фрейму, на який не прийшло підтвердження. Якщо ця спроба вдалася, одержувач буде в змозі передати мережевому рівню накопичені фрейми в належному порядку. Вибірковий повтор часто потребує збільшення пам'яті для каналного рівня одержувача.

Кумулятивний тип підтвердження вважає, що якщо поступає підтвердження на фрейм n , то фрейми $(n-1)$, $(n-2)$ і так далі, тобто усі попередні фрейми, вважаються підтвердженими. Це знижує надійність роботи в каналах з завадами [4].

Як було указано вище, в процесі передачі фреймів даних в зашумлених каналах виникають проблеми, пов'язані з пошкодженням бітів даних завадами. Ці завади можуть мати внутрішню природу, обумовлену інтерференцією сигналів, що передаються в каналах мереж. Особливо це актуально в сучасних високошвидкісних мережах, технології передачі інформації в яких реалізують підвищення щільності сигналів, які передаються. Зовнішні завади в середовищі передачі даних виникають внаслідок дії різноманітних джерел випромінювання електромагнітної енергії, які можуть бути також створені штучно.

Постановка задачі. Дослідити процес конвеєрної передачі блоків фреймів інформації на каналному рівні в зашумлених каналах комп'ютерних мереж. Визначити залежність загальної кількості фреймів переданих успішно і пошкоджених при передачі від об'єму додатку, що передається, довжини вікна і імовірності його успішної пере-

дачі. Визначити обмеження на довжину вікон при різних рівнях інтенсивності бітових помилок.

Основна частина. При дослідженні механізмів передачі інформації в зашумленому середовищі найбільш часто використовують дискретний у часі Гаусовський канал без пам'яті. В такому каналі бітові помилки є незалежними і рівномірно розподіленими по розрядах інформації, що передається [5]. Нехай L та P_b позначають довжину фрейму та імовірність помилки в одному розряді фрейму (bit error rate - BER) відповідно. Тоді імовірність того, що фрейм довжини L буде успішно переданий, тобто переданий непошкодженим, дорівнює:

$$P_{FS} = (1 - P_{b1})(1 - P_{b2})(1 - P_{b3}) \dots (1 - P_{bL}) = (1 - P_b)^L, \quad (1)$$

де $P_{b1} = P_{b2} = P_{b3} = \dots = P_{bL} = P_b$.

Припустимо, що передача інформації здійснюється на каналному рівні комп'ютерної мережі з використанням ковзного вікна довжиною n фреймів. Розглянемо спочатку ситуацію, коли рівень шуму є невеликим – $BER = 5 \cdot 10^{-7}$. Довжину поля даних фрейму приймемо стандартною, відповідно до технології Ethernet вона дорівнює $L = 1,5 \text{ kB} = 12000 \text{ б}$. Заголовок фрейму складає 26 В, тобто приблизно 1,7% від довжини поля даних, тому в подальших розрахунках ми не будемо його приймати до уваги.

Імовірність успішної передачі ковзного вікна з n фреймами згідно формулі (1) дорівнює

$$P_{WS} = (1 - P_b)^{L \cdot n}. \quad (2)$$

Для $n=6$ $P_{WS} = 0,965$. При цьому $n \cdot P_{WS} = 5,79$, тобто в першому наближенні можна вважати, що усі 6 фреймів ковзного вікна успішно проходять до одержувача. Але існує, хоч і достатньо мала, але кінцева імовірність пошкодження фреймів вікна :

$$P_{WD} = 1 - P_{WS} = 0,035. \quad (3)$$

Відповідно до цього при передачі значної кількості фреймів достатньо об'ємного додатку деяка частина фреймів буде пошкоджена.

Розглянемо передачу додатку об'ємом в N_0 фреймів. Розіб'ємо цей додаток на блоки по n фреймів в кожному блоці. Тут розмір блоку співпадає з розміром вікна. Позначимо загальну кількість блоків фреймів, переданих успішно і пошкоджених при передачі як Q_{Σ} . Тоді

$$Q_{\Sigma} = \frac{N_0}{n} + \frac{N_0}{n} \cdot P_{WD} = \frac{N_0}{n} (2 - P_{WS}), \quad (4)$$

де імовірність успішної передачі блока фреймів, тобто фреймів в межах ковзного вікна, визначається формулою (2).

Після даного етапу передачі вікно зсувається на n фреймів, тобто на довжину блока. Пошкоджені в процесі передачі фрейми виявляються відправником або по закінченню тайм-ауту очікування підтвердження АСК, або при одержанні негативного підтвердження NAK. На другому етапі передачі ці пошкоджені фрейми включаються у наступний блок і доповнюються наступними послідовними за номерами фреймами передаваного додатку. Якщо інтенсивність завад є невеликою можна вважати, що другим етапом закінчується передавання пошкоджених на першому етапі фреймів, і після

цього етапу буде можливість розташувати усі фрейми першого блоку в послідовному (за номерами) порядку і відправити на каналний рівень одержувача.

Розглянемо цей процес більш докладно на прикладі. Припустимо, що додаток, який потрібно передати, має об'єм 1,5 МВ, довжина фрейму, як і раніше, – 1,5 кВ. Інтенсивність завад характеризується $BER=5 \cdot 10^{-7}, 10^{-6}, 5 \cdot 10^{-6}$. Довжина вікна змінюється від $n=6$ до $n=40$. Одержані дані представлені в таблиці 1.

Загальна кількість фреймів, переданих успішно і пошкоджених при передачі.

Таблиця 1

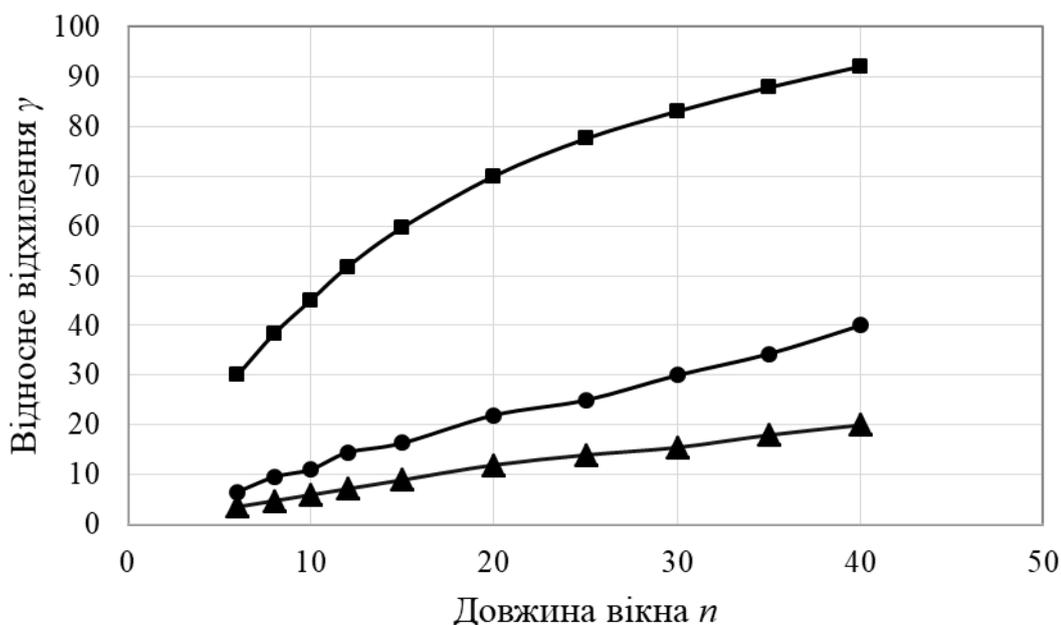
N	BER= $5 \cdot 10^{-7}$			BER= 10^{-6}			BER= $5 \cdot 10^{-6}$		
	P_s	N_0/n	Q_Σ	P_s	N_0/n	Q_Σ	P_s	N_0/n	Q_Σ
6	0,965	167	172	0,931	167	177	0,698	167	216
8	0,953	125	131	0,908	125	137	0,619	125	173
10	0,942	100	106	0,887	100	111	0,549	100	145
12	0,931	83	89	0,856	83	95	0,487	83	126
15	0,914	67	73	0,835	67	78	0,407	67	107
20	0,887	50	56	0,787	50	61	0,301	50	85
25	0,861	40	46	0,741	40	50	0,223	40	71
30	0,835	33	38	0,698	33	43	0,165	33	60
35	0,811	29	34	0,657	29	38	0,122	29	54
40	0,787	25	30	0,619	25	35	0,091	25	48

Як видно з табл.1 при збільшенні довжини вікна відносно відхилення між N_0/n і Q_Σ збільшується. Цей ефект суттєво підсилюється при збільшенні інтенсивності завад, тобто величини BER. Іншими словами, кількість повторних етапів пересилання вікон, необхідних для формування вірної (першочергової) послідовності фреймів збільшується, збільшуючи в свою чергу затримку передачі даних додатка. На рис.1 показані залежності відносного відхилення $\gamma=(Q_\Sigma-N_0/n)/N_0/n$ від довжини вікна n при різних значеннях BER.

Аналіз даних табл.1 і залежностей на рис.1 показує, що при збільшенні довжини вікна і інтенсивності завад (BER) кількість викривлених завадами фреймів, які необхідно передати на другому етапі при заповненні ковзного вікна наступним блоком фреймів, збільшується. Цей наступний блок містить як викривлені на першому етапі фрейми так і наступні за послідовністю фрейми, які передаються перший раз. При порівняно невеликому рівні помилок $BER= 5 \cdot 10^{-7}$ навіть при великій довжині вікна $n=40$ кількість копій фреймів, що передаються у складі вікна на другому етапі не перевищує 20%.

При $BER=10^{-6}$ ця кількість вже складає 40% тобто не можна виключити, що частина з цих викривлених на першому етапі передачі фреймів буде повторно викривлена при передачі на другому етапі і увійде в склад третього вікна. Це приведе до помітного збільшення затримки, необхідної для формування вірної послідовності з 40 фреймів потоку, що поступила з мережевого рівня відправника на його каналний рівень.

При підвищеному рівні завад ($BER= 5 \cdot 10^{-6}$) ситуація суттєво погіршується, що відображається верхньою кривою на рис.1. Якщо при невеликому вікні з $n=8$ кількість викривлених на першому етапі передачі фреймів наближується до 40, то при $n=40$ вона вже складає 92%. При цьому існує суттєва імовірність використання третього і четвертого етапів передачі для формування необхідної послідовності фреймів. Щоб уникнути цього явища, яке суттєво зменшує смугу пропускання мережі, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER= 5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.



Рисцнок 1 - Відносне збільшення загальної кількості фреймів γ від довжини вікна n : ▲ - $BER= 5 \cdot 10^{-7}$, ● - $BER=10^{-6}$, ■ - $BER= 5 \cdot 10^{-6}$.

Висновки. Досліджено процес конвєсрної передачі фреймів інформації на другому рівні в зашумлених каналах комп'ютерних мереж. В якості модельного застосовано гаусовський канал без пам'яті, в якому бітові помилки є незалежними і рівномірно розподіленими по розрядах інформації, що передається. Інтенсивність помилок відображається параметром BER (Bit Error Rate).

Передача інформації здійснюється за допомогою блоків фреймів, розмір блоків співпадає з розміром ковзного вікна. Визначено залежність загальної кількості фреймів переданих успішно і пошкоджених при передачі від об'єму додатку, що передається, довжини вікна і імовірності успішної передачі його блоку.

Показано, що при збільшенні довжини вікна і інтенсивності завад (BER) кількість викривлених завадами фреймів, які необхідно передати на другому етапі при заповненні ковзного вікна наступним блоком фреймів, збільшується.

При порівняно невеликому рівні помилок $BER= 5 \cdot 10^{-7}$ навіть при великій довжині вікна $n=40$ кількість копій фреймів, що передаються у складі вікна на другому етапі не перевищує 20%. При $BER=10^{-6}$ ця кількість вже складає 40% тобто частина з цих фреймів буде повторно викривлена при передачі на другому етапі і увійде в склад

третього вікна. Це приведе до збільшення часу, необхідного для формування послідовності фреймів що поступила з мережевого рівня відправника. При підвищеному рівні завад ($BER=5 \cdot 10^{-6}$) ситуація ще суттєво погіршується. Щоб не допустити суттєвого зменшення смуги пропускання мережі, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER=5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kurose, James F., Ross, Keith W. Computer Networking. A Top – Down Approach, 6th edition. New Jersey, Pearson Education, Inc. 2013. 889 P.
2. Khandetskyi, V.S., Karpenko, N.V. (2022). Modeling of IEEE 802.11 Computer Networks at Increased Interference Intensity. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 2. P. 132-139.
3. Tanenbaum, A., Wetherall, D. Computer Networks, 5th edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 2011. 960 P.
4. Khandetskyi V.S., Sivtsov D.P., Panin K.V. Data transfer rate in noisy channels of wireless networks. *System Technologies*. 2021. No.1 (132). P.136-144.
5. Cover T., Thomas J. Elements of Information Theory. John Wiley & Sons. 1991. 328 P.

REFERENCES

1. Kurose, James F., Ross, Keith W. Computer Networking. A Top – Down Approach, 6th edition. New Jersey, Pearson Education, Inc. 2013. 889 P.
2. Khandetskyi, V.S., Karpenko, N.V. (2022). Modeling of IEEE 802.11 Computer Networks at Increased Interference Intensity. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 2. P. 132-139.
3. Tanenbaum, A., Wetherall, D. Computer Networks, 5th edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 2011. 960 P.
4. Khandetskyi V.S., Sivtsov D.P., Panin K.V. Data transfer rate in noisy channels of wireless networks. *System Technologies*. 2021. No.1 (132). P.136-144.
5. Cover T., Thomas J. Elements of Information Theory. John Wiley & Sons. 1991. 328 P.

Received 12.01.2026.
Accepted 15.01.2026.

The pipeline transmission of frame blocks in noisy computer channels

The process of pipeline transmission of information frames at the second level in noisy channels of computer networks has been studied. As a model, we use a Gaussian memoryless channel, in which bit errors are independent and uniformly distributed over the bits of the transmitted information. The error intensity is reflected by the BER (Bit Error Rate) parameter. Information is transmitted using frame blocks, the size of the blocks coincides with the size of the sliding window. The dependence of the total number of frames transmitted successfully and damaged during transmission on the volume of the transmitted application, the length of the window and the probability of its successful transmission has been determined. Analysis of the obtained data shows that with increasing window length and interference intensity (BER), the number of frames distorted at the first stage of transmission increases. The distorted frames must be transmitted at the second stage when filling the sliding window with the next block of frames. This next block contains both the frames distorted at the first stage

and the frames following in sequence, which are transmitted for the first time. It is shown that with a relatively small error rate $BER=5 \cdot 10^{-7}$ and the use of the window contained $n=40$ standard frames, the number of copies of damaged frames transmitted as part of the window at the second stage does not exceed 20%. At $BER=10^{-6}$ this number is already 40%, i.e. some of these frames will be re-distorted during transmission at the second stage and will be included in the third window. This will lead to an increase in the time required to form the same sequence of frames that arrived from the third network layer. At higher interference levels ($BER=5 \cdot 10^{-6}$), the situation worsens significantly. If, with a small window of $n=8$, the number of frames distorted at the first stage of transmission approaches 40, then at $n=40$ it is already 92%. In this case, there is a significant probability of using the third and fourth stages of transmission to form the required sequence of frames. To avoid a significant reduction in network throughput, it is necessary to limit the window length to $n=6$ at $BER=5 \cdot 10^{-6}$ and $n=20$ at $BER=10^{-6}$.

Хандецький Володимир Сергійович – д.т.н., професор, зав. кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-4637>

Полухін Геннадій Володимирович – ст. викл., зав. лабораторії кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4705-6105>

Скуратовський Ігор Анатолійович – к.ф.-м.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олеса Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9444-5988>

Khandetskyi Volodymyr Sergievich – Doctor of Sciences, Professor, Head of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-4637>

Polukhin Gennadiy Volodymyrovich – Senior Lecturer, Head of Laboratory of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4705-6105>

Skuratovskyi Ihor Anatoliyovych - candidate of physical and mathematical sciences, docent of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9444-5988>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПАТЕРНІВ

Анотація. Розглянуто та систематизовано особливості реалізації основних породжувальних патернів мовами програмування C#, C++, Python та Java. Проведено порівняльний аналіз реалізацій патернів. Визначено спільні риси та відмінності у підходах до реалізації патернів залежно від рівня типізації та механізмів керування пам'яттю.

Ключові слова: патерн, Factory Method, Abstract Factory, Builder, Prototype, Singleton, порівняльний аналіз, реалізація, мови програмування.

Вступ. Одним із ключових інструментів об'єктно-орієнтованого проєктування є патерни проєктування, які являють собою формалізовані, перевірені практикою рішення типових архітектурних проблем. Особливе місце серед них займають породжувальні патерни проєктування, основним завданням яких є абстрагування процесу створення об'єктів та зменшення залежностей між компонентами системи. Використання породжувальних патернів дозволяє уникати жорсткої прив'язки коду до конкретних класів, спрощує розширення системи та підвищує її стійкість до змін.

Актуальність дослідження патернів проєктування обумовлена тим, що саме процес створення об'єктів часто стає джерелом архітектурних проблем у складних програмних системах. Некоректно організований механізм ініціалізації об'єктів може призводити до надмірної зв'язаності компонентів, дублювання коду, ускладнення тестування та зниження якості програмного забезпечення загалом.

Використання патернів часто викликає труднощі, пов'язані з вибором конкретного патерна, особливостями реалізації різними мовами програмування та оцінкою доцільності застосування в реальних проєктах. Особливо це актуально в умовах багатомовних проєктів, коли одна й та сама архітектурна ідея реалізується засобами мов із різними парадигмами, моделями типізації та механізмами керування пам'яттю.

Метою статті є розгляд особливостей реалізації основних породжувальних патернів, виконання порівняльного аналізу, а також оцінювання впливу мовних засобів на архітектурні рішення та якість програмного коду.

Основна частина. Вперше патерни описали Gang of Four (GoF)[1]. Саме після їхньої роботи патерни почали входити до університетських курсів, стандартів інженерії програмного забезпечення та корпоративних практик.

Необхідним етапом проведення порівняльного аналізу є обґрунтований вибір середовищ програмування та інструментів розробки, які забезпечують стабільність, відт-

ворюваність результатів і зручність аналізу. В роботі використовувались два інтегровані середовища розробки (IDE), які є де-факто стандартами для відповідних мов програмування [2-5].

Для реалізації та тестування патернів мовами C#, C++ та Python обрано середовище Microsoft Visual Studio, а для мови Java - середовище IntelliJ IDE.

Для забезпечення коректності та відтворюваності результатів використовувалися стандартні бібліотеки мов програмування, без залучення сторонніх фреймворків, щоб уникнути впливу зовнішніх оптимізацій; уніфіковано логіку прикладів, аби всі реалізації патернів виконували однакові дії та мали порівнювану складність; використано вбудовані засоби вимірювання часу виконання, доступні у відповідних мовах програмування; забезпечено однакові умови запуску програм, зокрема запуск у режимі Release (де це можливо) та вимкнення зайвих фонових процесів; проведено попереднє тестування середовищ, щоб переконатися у коректності налаштувань і стабільності виконання [5].

Детально проаналізовано п'ять ключових породжувальних патернів: Factory Method, Abstract Factory, Builder, Prototype та Singleton. Для кожного з них визначено сферу застосування, переваги, обмеження та типові сценарії використання у сучасних програмних системах. Для забезпечення коректності та об'єктивності аналізу всі патерни реалізовувалися з однаковою логічною структурою, що дозволило безпосередньо порівнювати отримані рішення. Реалізації були виконані з урахуванням особливостей кожної мови програмування, зокрема моделей типізації, синтаксичних конструкцій, механізмів керування пам'яттю та стандартних бібліотек.

Для порівняльного аналізу оцінювання здійснювалось за такими критеріями, як:

- кількість рядків коду (LOC);
- складність написання та обсяг шаблонного коду;
- типізація та її вплив на архітектурну строгість;
- зручність реалізації та читабельність коду;
- потенційна ефективність виконання та особливості компіляції або запуску.

Першим розглядався патерн *Factory Method*, для його об'єктивного аналізу використовувалась однакова логічна реалізація, яка створювала два продукти (ProductA, ProductB), застосовувала абстрактний Creator, об'єкти створювалися через перевизначений *factory method*, виконувала однакову кількість операцій. Результати порівняння наведені у таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Загальне порівняння

Мова	LOC	Boilerplate code	Складність написання	Коментар
C++	~95	Високий	Висока	Найбільший контроль, але складний
Java	~90	Високий	Середня	Класичний GoF-еталон
C#	~70	Середній	Середньо-низька	Синтаксичні спрощення
Python	~50	Низький	Низька	Найкоротший і найгнучкіший

Таблиця 2

Мова	Вплив на патерн
C++	Патерн потрібний для контролю
Java	Патерн — архітектурний стандарт
C#	Патерн можна спростити
Python	Патерн часто концептуальний

Для забезпечення коректності та відтворюваності результатів аналізу використано ідентичну логічну структуру патерна *Abstract Factory* для всіх чотирьох мов програмування[6-7]. Реалізація базується на класичному GoF-підході та має такі спільні характеристики: визначено два типи абстрактних продуктів (ProductA, ProductB); реалізовано два сімейства конкретних продуктів (Family 1 та Family 2); створено абстрактну фабрику з методами створення кожного типу продуктів; клієнтський код працює виключно з абстракціями, без знання конкретних класів; заміна фабрики повністю змінює сімейство створюваних об'єктів без модифікації клієнта. Результати порівняння наведені у таблицях 3 та 4.

Таблиця 3

Загальне порівняння

Мова	LOC (≈)	Boilerplate code	Складність написання	Коментар
C++	~150	Дуже високий	Висока	Максимальна строгість, складне керування пам'яттю
Java	~145	Дуже високий	Середньо-висока	Класичний еталон GoF, добре масштабується
C#	~130	Високий	Середня	Менше шаблонного коду, ніж у Java
Python	~95	Низький	Низька	Найкомпактніша реалізація

Таблиця 4

Мова	Вплив на патерн
C++	Патерн критично важливий для безпеки та контролю
Java	Патерн є архітектурним стандартом
C#	Дозволяє спростити реалізацію без втрати структури
Python	Патерн носить концептуальний характер

Для аналізу патерна *Builder* використано однакоvu логічну модель побудови складного об'єкта, яка повністю відповідає класичному опису GoF: наявний складний продукт з трьома частинами (PartA, PartB, PartC); визначено інтерфейс Builder, що описує поетапне створення продукту; реалізовано ConcreteBuilder, який інкапсулює процес складання; використано Director, що задає фіксований порядок побудови; клієнт отри-

мує готовий продукт лише після завершення конструювання. Результати порівняння наведені у таблицях 5 та 6.

Таблиця 5

Загальне порівняння

Мова	LOC (≈)	Boilerplate code	Складність написання	Коментар
C++	~120	Високий	Висока	Максимальний контроль, мінімальні runtime-витрати
Java	~115	Високий	Середньо-висока	Канонічна GoF-реалізація
C#	~105	Середній	Середня	Менше шаблонного коду
Python	~80	Низький	Низька	Найкомпактніша реалізація

Таблиця 6

Мова	Вплив на патерн
C++	забезпечує строгий контроль структури
Java	патерн формалізує складні конструктори
C#	часто комбінується з fluent-інтерфейсами
Python	має більше концептуальний характер

Для проведення коректного порівняльного аналізу патерна *Prototype* використано ідентичну концептуальну модель: визначено інтерфейс *Prototype* з методом *clone()*; реалізовано *ConcretePrototype* з двома полями стану (*FieldA*, *FieldB*); клонування виконується шляхом створення нового об'єкта того ж класу з копіюванням значень полів; використано *Prototype Registry*, який зберігає прототипи та повертає їх клони за ключем; клієнтський код працює виключно через механізм клонування. Результати порівняння наведені у таблицях 7 та 8.

Таблиця 7

Загальне порівняння

Мова	LOC (≈)	Boilerplate code	Складність написання	Коментар
C++	~110	Високий	Висока	Повний контроль над пам'яттю
Java	~100	Високий	Середня	Відмова від <i>Cloneable</i> підвищує безпеку
C#	~90	Середній	Низько-середня	Проста та чиста реалізація
Python	~70	Низький	Низька	Найкоротший та найчитабельніший код

Таблиця 8

Мова	Вплив на патерн
C++	Prototype необхідний для безпечного копіювання
Java	Патерн замінює небезпечний Cloneable
C#	Чітка, безпечна модель клонування
Python	Prototype часто замінюється сору

Для проведення коректного порівняльного аналізу патерна *Singleton* використано однакову логічну модель побудови: приватне статичне поле, яке зберігає єдиний екземпляр класу; приватний конструктор, що унеможливує створення об'єкта ззовні; публічний статичний метод доступу, який перевіряє, чи існує екземпляр та за потреби створює його; повертає посилання на нього. Результати порівняння наведені у таблицях 9 та 10.

Таблиця 9

Загальне порівняння

Мова	LOC (≈)	Boilerplate code	Складність написання	Коментар
C++	45	Високий	Середня	Потребує ручного керування пам'яттю
Java	40	Середній	Середня	Класичний GoF-підхід
C#	38	Низький	Низька	Найбільш компактна статично типізована версія
Python	30	Мінімальний	Мінімальна	Логічна імітація приватності

Таблиця 10

Мова	Вплив на патерн
C++	Повний контроль над пам'яттю
Java	Явне розділення відповідальностей.
C#	Реалізація не є потокобезпечною
Python	Відсутність суворих обмежень на створення об'єкта;

Патерн *Singleton* у всіх реалізаціях повністю відповідає класичному визначенню та працює ідентично з точки зору клієнтського коду. Проте вибір мови програмування суттєво впливає на: обсяг коду; складність реалізації; контроль над ресурсами; продуктивність виконання.

C# є найкращим компромісом між читабельністю, компактністю та строгістю. C++ доцільний у системах з критичними вимогами до швидкодії. Python оптимальний для швидкого прототипування. Java забезпечує класичну, надійну та формалізовану реалізацію.

Висновки. За результатами проведеного аналізу встановлено, що мова *Python* забезпечує найменший обсяг коду та найнижчий поріг входження для реалізації поро-

джувальних патернів, що робить її зручною для прототипування та швидкої розробки. Водночас динамічна типізація зменшує рівень формального контролю та може ускладнювати підтримку великих систем.

Мова *C#* продемонструвала оптимальний баланс між строгістю архітектури та зручністю реалізації. Мова дозволяє реалізовувати породжувальні патерни з меншими накладними витратами порівняно з *Java*, зберігаючи при цьому переваги статичної типізації та сучасних мовних конструкцій.

Мова *Java* забезпечує найбільш формалізований та канонічний підхід до реалізації породжувальних патернів, що робить її зручною для великих корпоративних систем, де особливе значення мають підтримка, масштабованість та чітке дотримання архітектурних стандартів. Разом із тим це супроводжується більшим обсягом коду та значною кількістю шаблонних конструкцій.

Мова *C++*, у свою чергу, надає найвищий рівень контролю над ресурсами та потенційно найкращу продуктивність, однак реалізація породжувальних патернів цією мовою є найбільш складною з точки зору синтаксису, керування пам'яттю та загальним когнітивним навантаженням на розробника.

Загалом результати дослідження підтверджують, що ефективність застосування породжувальних патернів значною мірою залежить не лише від самого патерна, а й від обраної мови програмування та контексту використання. Патерни проектування не є універсальним рішенням, однак за умови обґрунтованого застосування вони суттєво підвищують якість архітектури програмного забезпечення, спрощують його розвиток та супровід.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. - Boston: Addison-Wesley, 1994.
2. Martin R. C. Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design. - Boston: Pearson Education, 2017.
3. Oracle Corporation. The Java Tutorials: Object-Oriented Design Concepts. - Official documentation Java.
4. Microsoft Corporation. Design Patterns in .NET. - Official documentation Microsoft Learn.
5. Gamma E. Design Patterns 25 Years Later: An Interview and Retrospective. - ACM Queue, 2019.
6. Microsoft Learn. Implementing Design Patterns in C#. - Microsoft Learn Documentation. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/modern-web-apps-azure/common-web-application-architectures>
7. Refactoring.Guru. Creational Design Patterns. - Online Software Design Patterns Guide. URL: <https://refactoring.guru/design-patterns/creational-patterns>

Received 12.01.2026.
Accepted 16.01.2026.

Comparative analysis of the effectiveness of pattern application

The paper presents a comprehensive theoretical and practical study of creational design patterns. The main attention was focused on the analysis of the mechanisms of object creation, reducing the coupling between system components and increasing the level of abstraction of architectural solutions. Five key patterns were analyzed in detail: Factory Method, Abstract Factory, Builder, Prototype and Singleton. The implementation of the patterns was performed in the programming languages C#, C++, Python and Java. To ensure the correctness and objectivity of the analysis, all patterns were implemented with the same logical structure, which allowed for direct comparison of the obtained solutions. The implementations accounted for the specific characteristics of each programming language, including typing models, syntactic constructs, memory management mechanisms and standard libraries.

For comparative analysis, the implementations were evaluated according to the following criteria:

- *number of lines of code (LOC);*
- *complexity of writing and amount of template code;*
- *typing and its impact on architectural rigor;*
- *ease of implementation and readability of the code;*
- *potential performance and features of compilation or launch.*

According to the results of the analysis, Python provides the smallest amount of code and the lowest threshold of entry for implementing generative patterns, which makes it convenient for prototyping and rapid development. At the same time, dynamic typing reduces the level of formal control and can complicate the support of large systems.

C# demonstrated the optimal balance between architectural rigor and ease of implementation. The language allows implementing generative patterns with lower overhead compared to Java, while maintaining the advantages of static typing and modern language constructs.

Java provides the most formalized and canonical approach to implementing generative patterns, making it suitable for large enterprise systems where maintainability, scalability, and strict adherence to architectural standards are of particular importance. However, this comes with a larger amount of code and a significant number of template constructs.

C++, in turn, provides the highest level of control over resources and potentially the best performance, however, the implementation of generative patterns in this language is the most complex in terms of syntax, memory management, and overall cognitive load on the developer.

The conclusions and practical results obtained in the work can be used in object-oriented programming, as well as in the practical activities of software developers when choosing architectural solutions for real software projects.

Матвєєва Наталія Олександрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет ім. Олесь Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3774-5679>

Matveeva Nataliya Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the department of Electronic Computing Machinery, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3774-5679>

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З МОЖЛИВІСТЮ ФЕДЕРАТИВНОГО НАВЧАННЯ ТА ДОНАВЧАННЯ ГЕНЕРАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація. У роботі розглянуто розробку та дослідження інформаційної системи для генерації зображень на основі сучасних генеративних моделей штучного інтелекту з підтримкою федеративного навчання та механізмів донавчання. Запропонована система орієнтована на забезпечення ефективної генерації візуального контенту з одночасним збереженням конфіденційності даних користувачів, що є особливо актуальним в умовах обмеженого доступу до централізованих наборів даних.

Метою роботи є розробка інформаційної системи для генерації зображень з можливістю федеративного навчання та донавчання генеративних моделей.

Розроблена інформаційна система може бути використана у завданнях, де важливо навчати генеративні моделі без передачі даних на сервер, що забезпечує захист конфіденційною інформації.

У майбутньому планується розширення функціональності системи, у тому числі додавання повноцінної реєстрації та авторизації, можливість застосовувати кілька LoRA-адаптерів одночасно, збільшення доступних для навчання та генерації моделей і реалізація додаткових алгоритмів для федеративного навчання.

Ключові слова: машинне навчання, дифузійні моделі, нейромережа, генеративно-змагальні мережі, тестування, варіаційні автокодувальники, федеративне навчання.

Вступ. Актуальність цієї теми обумовлена стрімким розвитком області машинного навчання і штучного інтелекту, а також зростаючими вимогами до захисту персональних даних.

- Сучасні генеративні моделі потребують великих обсягів даних та обчислювальних потужностей, що ускладнює централізоване навчання.

- Федеративне навчання дає можливість навчати моделі безпосередньо на пристроях користувачів, забезпечуючи захист даних.

- Розподілений підхід зменшує навантаження на центральні сервери.

Метою роботи є розробка інформаційної системи для генерації зображень з можливістю федеративного навчання та донавчання генеративних моделей.

Викладення основного матеріалу. Генеративно-змагальні мережі (Generative Adversarial Networks, GANs), являють собою моделі, у яких дві нейронні мережі (генератор та дискримінатор) навчаються у процесі змагання [1].

GAN - один із алгоритмів класичного машинного навчання, навчання без учителя.

Суть ідеї в комбінації двох нейромереж, при якій одночасно працює два алгоритми "генератор" і "дискримінатор".

Завдання генератора – створювати образи заданої категорії.

Завдання дискримінатора – намагатися розпізнати створений образ.

Таким чином генератор генерує певні образи. Наприклад, картинки, схожі на обличчя, а дискримінатор намагається визначити обличчя це було чи ні. І з часом мережа навчається настільки, що генератор генерує досить реалістичні обличчя.

Дискримінатор. Для розпізнавання використовуються згорткові нейронні мережі (CNN). CNN може розпізнавати образи на картинках, наприклад, виділяти з усього зображення обличчя, цифри тощо Щоб нейронна мережа навчилася щось розпізнавати, їй потрібно обробити велику кількість зображень, де містяться образи, потрібні для пошуку.

Дифузійні моделі (Diffusion Models) – це клас генеративних моделей, заснованих на процесі додавання шуму до даних та навчання нейромережі відновлювати вихідний розподіл [2].

Latent Diffusion Models (LDM) використовує енкодер для перетворення даних більш компактне латентне простір. LDM дозволяє працювати з меншими обсягами даних, що суттєво скорочує обчислювальні витрати [3].

Вихідне зображення x_0 за допомогою енкодера E перетворюється на латентний вектор ознак z_0 згідно з формулою (1):

$$z_0 = E(x_0), \quad (1)$$

де x_0 - зображення;

z_0 – латентне уявлення, що містить основні характеристики зображення 0;

E – енкодер.

Після завершення генерації, підсумковий латентний вектор z_t декодується в зображення з допомогою декодера D згідно формулою (2):

$$\hat{x}_0 = D(z_0), \quad (2)$$

де \hat{x}_0 - відновлене зображення;

z_0 - відновлене латентне уявлення;

D - Декодер.

Використання латентного простору дозволяє зменшити розмір даних, що скорочує час навчання та обсяг необхідної пам'яті. Крім того, латентні уявлення більш стійкі до шуму, що покращує якість відновлених зображень на виході.

Stable Diffusion представляє собою реалізацію LDM, розроблену для генерації високоякісних зображень на основі текстових описів [4].

Архітектура Stable Diffusion включає три компоненти – варіаційний автокодувальник (VAE), текстовий енкодер та UNet (рисунок 1).

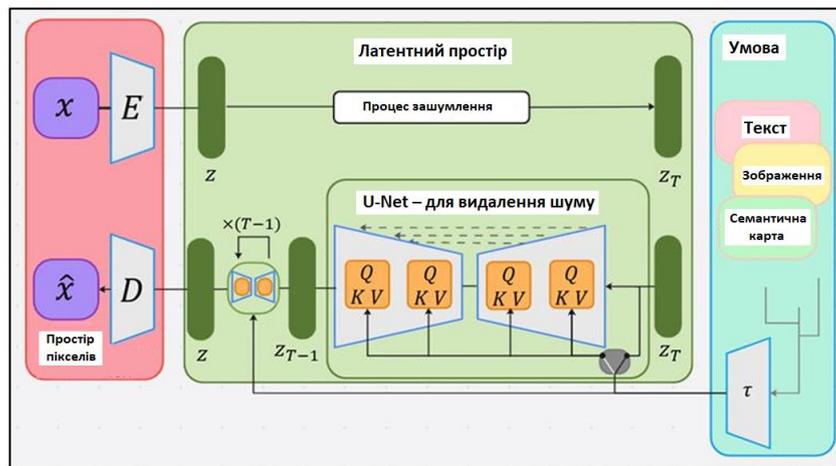


Рисунок 1 - Архітектура Stable Diffusion

Варіаційний автокодувальник (VAE) використовується для перетворення зображень x_0 в латентну виставу z_0 та навпаки.

Текстовий енкодер перетворює текстову підказку c в ембедінг $\tau(c)$, який є числовим вектором, що відображає семантичний зміст тексту. Цей ембедінг використовується для кожного кроку зворотного дифузійного процесу як умова генерації.

UNet – дифузійна нейронна мережа, що навчається передбачати доданий шум ϵ на кожному кроку t .

Stable Diffusion є гнучкою та потужною архітектурою для генерації зображень. Завдяки відкритому вихідному коду і інтеграцією з LoRA, вона може ефективно використовуватися при розподіленому навчанні, де особливо важливими є економія ресурсів та захист даних. Це робить її оптимальним вибором для застосунку, що розробляється.

Незважаючи на високу якість генерованих зображень, дифузійні, мають велику кількість параметрів, що робить їх навчання на нових даних вкрай ресурсомісткими. Для вирішення цієї проблеми використовується метод LoRA (Low-Rank Adapatation) [5].

Основна ідея LoRA полягає в тому, щоб залишити вихідні ваги моделі незмінними (замороженими) і додати до них низькорангове доповнення. Замість оновлення повної матриці, LoRA навчає дві значно менші матриці.

Даний процес представлений формулою (3):

$$W = W_0 + \Delta W, \tag{3}$$

де W - підсумкова вагова матриця шару;

W_0 - заморожена матриця ваг, отримана з передбаченої моделі;

ΔW - низькорівневе адаптивне додавання до ваг (LoRA-ін'єкція), виражене через матриці A і B ;

$A \in \mathbb{R}^{r \times k}$, $B \in \mathbb{R}^{d \times r}$ - учні матриці адаптації;

r - ранг адаптації;

d - розмірність вихідного простору шару;

k - розмірність вхідного простору шару.

Даний підхід дозволяє значно знизити кількість параметрів, що навчаються з $d \times k$ до $r \times (d + k)$, що критично важливо при використанні дифузійних моделей в умовах обмежених обчислювальних ресурсів або для персоналізованої генерації.

Федеративне навчання – це метод машинного навчання, у якому моделі навчаються на розподілених пристроях, без передачі локальних даних на централізований сервер [6].

Процес федеративного навчання має ітеративну процедуру взаємодії між центральним сервером і множеною клієнтів, які мають власні набори даних. На першому етапі сервер ініціалізує глобальну модель і відправляє її параметри всім підключеним клієнтам. Отримавши модель, кожен клієнт проводить локальне навчання на своїх приватних користувальницьких даних, не передаючи самі дані, а лише використовуючи їх для оновлення локальних копій моделі. Після завершення локального навчання клієнти надсилають на сервер оновлені параметри своїх моделей для агрегації, після чого процес повторюється (рисунок 2).

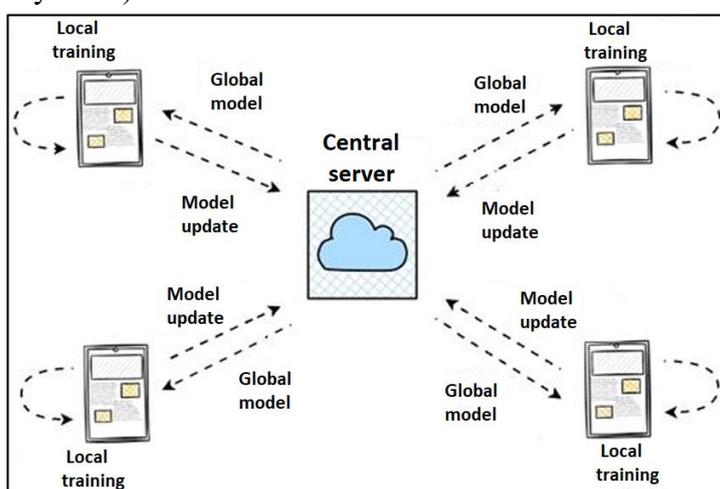


Рисунок 2 - Схема федеративного навчання

Федеративне навчання дифузійних моделей.

FedAvg – це один із найпопулярніших алгоритмів федеративного навчання, заснований на усередненні локальних оновлень моделей, навчених на даних клієнтів [6]. Глобальна модель представлена параметрами, які оновлюються згідно з формулою (4).

$$\omega^{(t+1)} = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} \omega_k^{(t+1)}, \quad (4)$$

де: $\omega^{(t+1)}$ - параметри глобальною моделі на ітерації $t + 1$;

$\omega^{(t+1)}$ - параметри локальною моделі на клієнта k на ітерації $t + 1$;

n_k - кількість даних на клієнта k ;

n - загальне кількість даних;

K - загальне кількість клієнтів.

Незважаючи на свою простоту та ефективність в умовах однорідних даних, FedAvg стикається з труднощами при роботі з неоднорідними даними. У таких ситуаціях локальні моделі можуть сильно відхилитися від глобальної, що сповільнює збіжність або наводить до нестійких результатів.

Як базовий алгоритм федеративного навчання у своєму зостасунку обрано FedAvg – надійне і поширене рішення, яке відрізняється простотою реалізації.

LoRA – це метод донавчання великих моделей, який додає до вихідних лінійних шарів низькорангові матриці $A \in \mathbb{R}^{r \times k}$ та $B \in \mathbb{R}^{d \times r}$, де r – ранг, а k та d – розміри вихідних шарів моделі. Замість донавчання всіх ваг, LoRA навчає матриці A і B залишаючи ваги фіксованими.

Алгоритм FedEx-Lora [7], розроблений для роботи з великомасштабними мовними моделями, вирішує проблему за допомогою залишкового оновлення, як показано у формулі (5):

$$W_0^{(t+1)} = W_0^t + \underbrace{\left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k^t A_k^t \right) - \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K B_k^t \right) \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k^t \right)}_{\Delta W^t}, \quad (5)$$

де: $W_0^{(t+1)}$ – оновлені параметри замороженої моделі для $t + 1$

W_0^t – параметри замороженої моделі на ітерації t

B_k^t та A_k^t – локальні матриці на клієнті k

ΔW^t – коригуюче оновлення, яке компенсує різницю між усередненим твором та твором усереднених матриць

K – кількість клієнтів

У FedEx-LoRA параметри базової моделі W_0 оновлюються на кожному раунді навчання, що фактично означає часткове навчання базової моделі.

Враховуючи особливості та переваги даного підходу, для реалізації федеративного навчання LoRA в зостасунку був обраний алгоритм FedEx-LoRA – як оптимальне рішення для коректної агрегації та підвищенні якості моделі.

Система, що розробляється, є клієнт-серверним застосунком, призначеним для генерації, донавчання та агрегації генеративних моделей і LoRA-адаптерів у рамках федеративного навчання. Система складається з серверної та клієнтської частин, що взаємодіють між собою по мережі через API. Сервер здійснює управління моделями, зберігання та агрегацію оновлень, а також координацію обміну даними. Клієнтська частина забезпечує взаємодію користувача з системою, а також виконує донавчання моделей та роботу з даними.

Діаграма послідовності, представлена на рисунку 3, ілюструє взаємодію користувача, клієнтської і серверної частин додатку у процесі федеративного навчання. На діаграмі відображено ключові етапи роботи системи: отримання моделі, локальне донавчання, надсилання оновлень та їх агрегація на сервері.

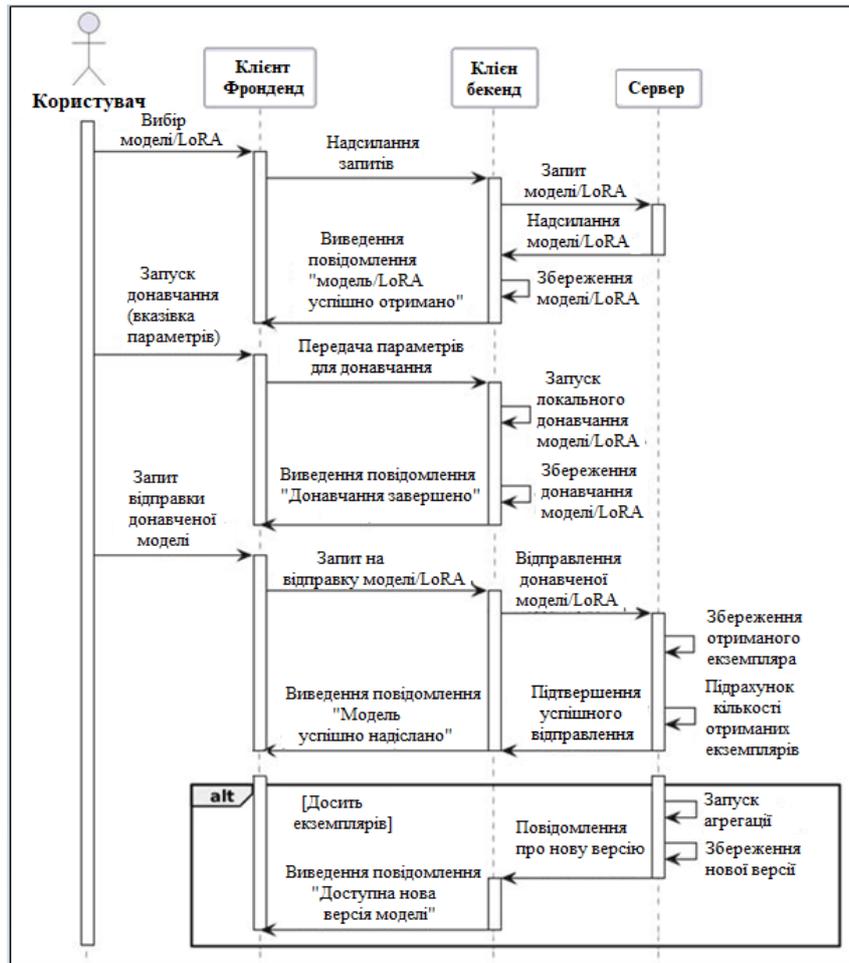


Рисунок 3 - Діаграма послідовності федеративного навчання

FedFlowServer є застосунком з використанням фреймворку Flask, що реалізує роботу сервера [8]. Сервер організований за модульним принципом з використанням окремих сервісів, кожен з яких відповідає за виконання конкретного завдання - генерацію UUID (Universally Unique Identifier), агрегацію моделей, роботу з файлами. Такий підхід забезпечує масштабованість, читаність коду та спрощує супровід системи.

FedFlow є клієнтським додатком, який забезпечує зручний інтерфейс для взаємодії з сервером, отримання інформації про моделі та LoRA-адаптери, а також дозволяє користувачам працювати з локальними даними.

Забезпечує:

- Взаємодію з сервером.
- Роботу з датасетами.
- Генерацію зображень.
- Навчання моделей і LoRA- адаптерів.
- Реалізацію користувальницького інтерфейсу.

Приклади текстового опису представлено на рисунку 4.



"Van_Gogh, outdoors, sky, cloud, "
 "signature, no_humans, night, traditional_media, "
 "moon, night_sky, scenery, full_moon, "
 "mountain, crescent_moon, acrylic_paint_(medium)"

Рисунок 4 - Приклади текстового опису

Тестування і аналіз результатів. Для оцінки якості федеративного навчання використовувалась метрика FID, що порівнювала розподіли згенерованих зображень та реальних даних. Як датасет використовувалися зображення Сема Альтмана - генерального директора OpenAI. Модель Stable Diffusion 1.5 з донавчанням через LoRA навчалася на п'яти клієнтах з нерівномірним розподілом даних: 20, 40, 60, 40 і 40 зображень. Навчання проходило у три раунди, кількість кроків на кожному клієнті розраховувалася на основі обсягу даних, розміру батча та числа епох, за однакових параметрів. Після кожного раунду за допомогою поточної версії моделі генерувалися зображення, на основі яких розраховувалося значення FID щодо тестової вибірки. Для порівняння також проводилося централізоване навчання моделі на повному наборі з 200 зображень. Значення метрики FID для централізованого навчання - 124,34.

Результати всіх проведених експериментів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментів

Раунд	Клієнт 1	Клієнт 2	Клієнт 3	Клієнт 4	Клієнт 5	Агрегована модель
1	178,39	165,66	147,22	166,21	175,23	150,51
2	168,57	155,09	140,83	150,42	162,77	138,04
3	160,48	150,5	135,77	152,39	157,26	133,85

Експерименти показали стійке покращення якості моделі з кожним раундом федеративного навчання, незважаючи на відмінності в обсягах даних клієнтів. Значення FID агрегованої моделі стабільно знижуються, що свідчить про зростання якості зображень. Хоча централізоване навчання на повному наборі даних дає кращі результати, федеративний підхід з використанням LoRA залишається ефективним при обмежених обчислювальних ресурсах та гетерогенності даних, забезпечуючи при цьому гідну якість зображень та знижуючи ризик витоку даних. Також проведено функціональне тестування системи за 14 основними сценаріями. Усі тести успішно пройдено, що підтверджує коректну роботу реалізованих компонентів [9].

Висновки. В результаті було розроблено інформаційну систему для генерації зображень з можливістю федеративного навчання та донавчання генеративних моделей.

Розроблена інформаційна система може бути використана у завданнях, де важливо навчати генеративні моделі без передачі даних на сервер, що забезпечує захист конфіденційної інформації.

ЛІТЕРАТУРА / REFERECES

1. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., et al. Generative Adversarial Networks. [Electronic resource] // arXiv.org. 2014 року. URL: <https://arxiv.org/pdf/1406.2661>
2. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Model. [Electronic resource] // arXiv.org. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2006.11239>
3. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., et al. High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models. [Electronic resource] // arXiv.org. 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2112.10752>
4. Xiang C., Wang L., Zhou M. Comparative Analysis of Generative Models: Enhancing Image Synthesis with VAEs, GANs, and Stable Diffusion. [Electronic resource] // arXiv.org. 2023. URL: <https://arxiv.org/pdf/2408.08751>
5. Stable Diffusion. [Electronic resource] URL: https://hugging-face.co/blog/stable_diffusion
6. Hu EJ, Shen Y., Wallis P., et al. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. [Electronic resource] // arXiv.org. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/2106.09685>
7. Yao Y., Gao T., Li W., et al. FedEx-LoRA: Exact Aggregation for Federated and Efficient Fine-Tuning of Foundation Models. [Electronic resource] // arXiv.org. 2025. URL: <https://arxiv.org/pdf/2410.09432>
8. Kairouz P., McMahan HB, Avench B., та інші. Advances and Open Problems in Federated Learning. [Electronic resource] // arXiv.org. 2021. URL: <https://arxiv.org/pdf/1912.04977>
9. Ostrovska K., Borysiuk V. «IMAGE GENERATION WITH THE ABILITY TO ENABLE FEDERATED TRAINING AND FURTHER TRAINING OF GENERATIVE MODELS» // the 3rd International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. November 12-14, 2025. Lisbon, Portugal. P 203-206.

Received 14.01.2026.
Accepted 16.01.2026.

Information system for image generation with the possibility of federated learning and further training of generative models

The paper discusses the development and research of an information system for image generation based on modern generative artificial intelligence models with support for federated learning and retraining mechanisms. The proposed system is focused on ensuring effective generation of visual content while maintaining the confidentiality of user data, which is especially relevant in conditions of limited access to centralized data sets.

The research analyzes the architecture of the information system, the principles of integration of generative models, as well as approaches to organizing federated learning, in which model parameters are updated on local nodes without transmitting the output data to the central server. Particular attention is paid to methods of retraining models, which allow the system to adapt to new types of images, styles and user requirements during operation.

The performance and efficiency of the proposed system are evaluated in terms of the quality of generated images, learning speed and resistance to changes in input data. The results obtained confirm the feasibility of using a federated approach and further training of generative models to create scalable, adaptive, and secure image generation information systems.

In the future, it is planned to expand the functionality of the system, including adding full registration and authorization, the ability to use multiple LoRA adapters simultaneously, increasing the number of models available for training and generation, and implementing additional algorithms for federated learning.

Островська Катерина Юріївна – доцент, к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем ННІ ДМетІ Українського державного університету науки і технологій.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9375-4121>

Борисюк Володимир Петрович - магістр кафедри інформаційних технологій і систем ННІ ДМетІ Українського державного університету науки і технологій.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0696-6523>

Ostrowska Kateryna - – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, NNI DMetI, Ukrainian State University of Science and Technology.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9375-4121>

Borysiuk Volodymyr - Master of the Department of Information Technologies and Systems, NNI DMetI, Ukrainian State University of Science and Technology.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0696-6523>

ПОВЕДІНКОВЕ ПРОФІЛЮВАННЯ КОРИСТУВАЧІВ ТА ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Анотація. У сучасних корпоративних середовищах поведінка користувачів і характеристики доступу до даних постійно змінюються, що ускладнює виявлення інсайдерських інцидентів і викликає нерівномірні хвилі хибних тривог у UEBA-системах. Через статичні пороги та надмірну розмірність профілі швидко втрачають актуальність за умов дрейфу концепції, а нестабільний потік тривог підвищує експлуатаційну вартість детектора. Метою роботи є розроблення методу поведінкового профілювання, який виявляє аномалії за відхиленнями від контекстуальної норми і є практично придатним завдяки контролю хибних спрацювань, стабільності сигналів і інтерпретованості. Запропоновано потокову формалізацію профілю з експоненційним забуванням та генетичний алгоритм для оптимізації конфігурації детектора (підмножини ознак, ваг, порога реагування і параметра адаптації) з урахуванням штрафів за хибні тривоги, волатильність алертів і складність моделі. Експерименти на CLUE-LDS із контрольованою зміною профілю показали помірне зростання $F1$ за одночасного зменшення хибнопозитивних тривог, зниження волатильності потоку тривог, зменшення середнього добового навантаження і скорочення складності до третини початкового набору ознак. Таким чином еволюційна конфігурація детектора задовільняє практичні експлуатаційні вимоги.

Ключові слова: поведінкове профілювання, UEBA, інсайдерські загрози, генетичний алгоритм, відбір ознак, дрейф концепції, хибні тривоги, стабільність тривог, потокові дані, корпоративна безпека.

Постановка проблеми. Системи корпоративної безпеки дедалі частіше функціонують в середовищах, де повсякденна активність користувачів не має стабільного профілю: змінюються ролі, команди, інструменти, канали взаємодії, а також способи доступу до даних. На цьому тлі інсайдерські інциденти особливо складні для виявлення, бо зловмисники маскуються під легітимних користувачів, а відхилення від норми зазвичай невеликі, розтягнуті в часі та розподілені між кількома типами подій. Через це детектори або пропускають повільні сценарії зловживань, або генерують постійні хибні тривоги, які потрібно фільтрувати вручну [1].

Поведінкове профілювання (UEBA) дозволяє не покладатися на набір статичних правил, однак воно приносить власний набір експлуатаційних проблем. Дані майже завжди незбалансовані: справжні інциденти рідкісні, а підозрілі епізоди трапляються

часто. Контекст має значну вагу у визначенні зловмисних дій, той самий обсяг копіювань або доступів може бути нормою для однієї ролі й тривожним сигналом для іншої. Для того щоб розслідування тривоги не перетворювалась на сліпий пошук, системі потрібна інтерпретованість, яка дозволить сформулювати аналітику гіпотезу, що саме пішло не так [2].

Навіть якщо модель добре підганяється під історичний період, зміна процесів або політик доступу та мінливість поведінкових патернів швидко робить її пороги тривог неефективними. В такій ситуації якість знижується не тільки в точності, а й у стабільності сигналів. Нестабільність тривог не дозволяє використовувати систему у великих організаціях, бо її вартість визначається не лише помилками, а й коливанням потоку сповіщень та часом аналітика на перевірку [3].

Виникає потреба в методі, який цілеспрямовано оптимізує практичні властивості детектора. Важливим є механізм, що дозволяє підбирати компактний набір поведінкових ознак і їх ваги під задані обмеження, зменшуючи хибні спрацювання та підтримуючи керовану складність моделі. Еволюційні методи, зокрема генетичні алгоритми, природно підходять до такої задачі як інструмент пошуку компромісу в просторі конфігурацій між точністю, ціною та інтепретованістю [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні оглядові роботи з інсайдерської детекції узгоджуються в тому, що ключова складність полягає не в браку алгоритмів як таких, а в їхній експлуатаційній придатності на реальних даних і в реальних процесах реагування [1]. Якість алгоритму напряму пов'язана із вартістю помилок: в інсайдерських сценаріях зниження хибних тривог часто не менш цінне, ніж невелике зростання повноти, бо саме хибні тривоги визначають навантаження на аналітиків.

Потрібно враховувати часові патерни та контекстні залежності реальної роботи організації, комбінуючи різні типи сигналів, включно з поведінковими та текстовими [5]. Таким чином, для побудови поведінкового опису користувача використовують кілька типів наборів ознак (зведення активності, тематичні характеристики листування, мережі комунікацій) [6]. Комплексний погляд на одного користувача часто дає відчутну практичну користь, але розширення простору опису підвищує ризик того, що модель почне реагувати на шум або на короточасні зміни процесів, продукуючи зайві сигнали. Це створює потребу в оптимізаційних методах, які здатні знаходити компактні підмножини ознак і визначати їх вагу.

Мультиступеневі пайплайни поєднують грубий етап звуження області інтересу та детальний аналіз потенційно підозрілих сегментів. Це зменшує обчислювальне навантаження й водночас допомагає уникати ситуації, коли система намагається глибоко аналізувати кожну дрібну подію в потоці. Це реалізується як послідовність рішень, що дозволяє керувати компромісом між точністю та обчислюваною складністю [4].

Дослідження, що сфокусовані на оптимізаційних методах, використовують еволюційні алгоритми як засіб для відбору ознак і налаштування порогів. Застосування генетичних алгоритмів до поведінково-орієнтованого виявлення аномалій демонструють навчання класифікатора, що ідентифікує поведінкові відхилення, і еволюційний пошук

здатний ефективно обирати комбінації ознак важливих для детекції [7]. Глобальний пошук в обмеженому просторі ознак усуває потребу у великих масивах міток.

У мережевих сценаріях генетичний алгоритм також використовується для налаштування підсистем збору та аналізу трафіку. В контексті програмно-визначених мереж (SDN) оптимізація ймовірностей вибірки трафіку дозволяє підвищити ефективність систем виявлення вторгнень, зменшуючи навантаження на контролер і не погіршуючи якість детекції [8].

Незалежно від вибору моделі визначення аномалій, використання генетичного алгоритму для відбору найбільш інформативних ознак знижує частки хибних спрацювань у порівнянні з базовими конфігураціями. Зокрема при побудові ансамбля дерев рішень Random Forest та XGBoost така синергія забезпечує покращення точності та зменшення кількості хибних тривог [9].

Детекція аномалій в Інтернеті речей демонструє спільні проблеми з профілюванням користувачів, брак даних із підтвердженим правдивими даними, різноманітність потоків подій, дрейф концепції та потребу в адаптивних методах, які можуть працювати без постійного нагляду аналітиків [10]. Еволюційні алгоритми розглядаються як один з інструментів, здатних коригувати роботу детектора в умовах зміни нормальної поведінки користувачів, контролюючи складність і кількість хибних тривог.

За умов дрейфу концепції оптимізувати в корпоративних системах доводиться не лише точність розпізнавання, а й операційні наслідки – керованість реакції, стійкість сигналів, витрати на обробку тривог, бюджет ресурсів [11]. Оскільки поведінкова норма в UEBA змінюється природно через організаційні процеси, без процедури контрольованого налаштування система швидко починає втрачати точність.

В сучасних стратегіях DLP, увага закономірно зміщується від одиничного алгоритму до цілісної архітектурної схеми: джерела сигналів, інтеграція з процесами реагування, обмеження на дані й розмітку, співіснування правил і моделей, а також питання підтримання якості в умовах змін [12]. І вартість хибних тривог визначається не як другорядна метрика, а системна характеристика, яка визначає придатність рішення до реальної експлуатації.

Дрейф концепції часто проявляється не як разовий збій моделі, а як послідовність переходів між режимами, де ознаки змін можуть бути слабкими, запізнілими або маскованими сезонністю й контекстом [13]. Для поведінкового профілювання детектор має або адаптуватися, або підтримувати стабільну політику консервативної реакції – і в обох випадках потрібні формальні механізми керування балансом чутливості та хибно-позитивних тривог.

Проблему дрейфу добре видно серед систем виявлення вторгнень, бо зміна трафіку, протоколів, інфраструктури та інструментів призводить до зміни інформативності ознак і деградації моделей. Надмірна залежність від великого, слабо контрольованого простору ознак підвищує ризик нестійких рішень. Модель починає описувати шум, що на практиці створює хвилі хибних тривог і надмірне навантаження на аналітиків [14]. В свою чергу, еволюційна оптимізація в завдяки керованому відбору підмножини ознак і

налаштування їх ваг, спрямована на стабілізацію поведінки детектора, а не на максимізацію абстрактної метрики.

Роботи з динамічної адаптації концептів в онлайн-аномалійних сценаріях показують, що практичний виграш часто досягається завдяки механізмам переузгодження моделі з потоком, але за ціною складніших процедур оновлення й контролю якості, що підкреслює необхідність в механізмах які дозволяють оновлювати уявлення про норму без неконтрольованої втрати стабільності [15].

Постановка завдання. Мета роботи полягає у побудові методу поведінкового профілювання користувачів, який виявляє аномалії на основі відхилень від контекстуальної норми та водночас залишається придатним до практичної експлуатації. Метод повинен забезпечувати мінімізацію кількості хибних тривог, зрозумілу логіку спрацювання і можливість адаптації до поступових змін поведінки та способів комунікації користувачів.

Для досягнення мети необхідно формально визначити поведінковий профіль як сукупність статистичних характеристик активності користувача у часових вікнах та задати міру відхилення поточної поведінки від базового коректного профілю. Потрібно розробити процедуру автоматизованого відбору ознак і корекції їх ваг, через те що надмірна розмірність погіршує узагальнення та ускладнює інтерпретацію. Також важливою є можливість контролювати зміщувати баланс між чутливістю та хибними спрацюваннями механізму прийняття рішення про аномалію, що критично для практичного використання методу в реальних системах корпоративної безпеки.

Узгоджений механізм пошуку конфігурації детектора під експлуатаційні вимоги забезпечується використанням генетичного алгоритма для визначення складу ознак, їхніх ваг і порогів реагування. Головна увага приділяється компромісу між якістю виявлення, стабільністю сигналів і інтерпретованістю, тобто на ті характеристики, які визначають реальну цінність UEBA-детектора для DLP-середовищ

Експериментальна частина роботи має перевірити, у яких саме умовах та за якими показниками така еволюційно налаштована конфігурація дає практичний виграш.

Виклад основного матеріалу. Потік спостережень корпоративного середовища розглядається як сукупність елементарних подій, кожна з яких фіксує дію користувача в часі разом із контекстом.

$$e = (u, t, a, r, s), \quad (1)$$

де u – ідентифікатор користувача; t – часова мітка; a – тип дії; r – ресурс/об'єкт доступу; s – контекстні атрибути (зокрема робоча станція, IP, роль, канал).

Для побудови профілю поведінка агрегується у часові вікна тривалістю $\Delta > 0$. Множина подій користувача u у вікні з індексом k визначається як

$$E_{u,k} = \{ e : e = (u, t, a, r, s) \wedge k\Delta \leq t < (k + 1)\Delta \}, \quad (2)$$

де $E_{u,k}$ – підмножина подій користувача u , часові мітки яких належать інтервалу $[k\Delta, (k + 1)\Delta)$; Δ – тривалість вікна; k – індекс вікна.

На основі $E_{u,k}$ формується вектор ознак поведінки.

$$x_u(k) = (x_{u1}(k), x_{u2}(k), \dots, x_{um}(k)), \quad (3)$$

де $x_u(k) \in \mathbb{R}^m$ – вектор ознак користувача u у вікні k ; m – кількість ознак; $x_{uj}(k)$ – значення j -ї ознаки. Конкретний склад ознак відповідає доступним журналам (автентифікація, файлові дії, мережеві з'єднання, доступ до сервісів) і повинен бути сумісним із UEBA-логами, на яких виконується оцінювання.

Щоб врахувати дрейф поведінки, для кожної ознаки підтримується «норма» у вигляді експоненційно зваженого середнього з коефіцієнтом забування $\rho \in (0,1)$.

$$\mu_{uj} = \rho \mu_{uj}(k-1) + (1-\rho)x_{uj}(k), \quad (4)$$

де $\mu_{uj}(k)$ – адаптивне середнє значення j -ї ознаки для користувача u у вікні k ; ρ – коефіцієнт забування; $x_{uj}(k)$ – поточне значення ознаки.

Масштаб ознак нормалізується через адаптивну дисперсію.

$$v_{uj}(k) = \rho v_{uj}(k-1) + (1-\rho)(x_{uj}(k) - \mu_{uj}(k))^2, \quad (5)$$

де $v_{uj}(k)$ – експоненційно зважена дисперсія j -ї ознаки; $(x_{uj}(k) - \mu_{uj}(k))^2$ – квадратичне відхилення.

Відхилення поточної поведінки від норми задається нормалізованою величиною.

$$d_{uj}(k) = \frac{|x_{uj}(k) - \mu_{uj}(k)|}{\sqrt{v_{uj}(k) + \varepsilon}}, \quad (6)$$

де $d_{uj}(k) \geq 0$ – нормалізована міра відхилення; $\varepsilon > 0$ – мала константа для чисельної стійкості.

Аномальність поведінки у вікні описується зваженою сумою відхилень, але лише за тими ознаками, які активовані конфігурацією детектора. Це забезпечує керовану складність і підґрунтя для інтерпретації.

$$S_u(k) = \sum_{j=1}^m b_j w_j d_{uj}(k), \quad (7)$$

де $S_u(k)$ – скалярний скор аномальності для користувача u у вікні k ; $b_j \in \{0,1\}$ – індикатор включення j -ї ознаки; $w_j \geq 0$ – вага ознаки.

Рішення про тривогу задається порогом τ .

$$y_u(k) = I(S_u(k) \geq \tau), \quad (8)$$

де $y_u(k) \in \{0,1\}$ – вихід детектора (1 – тривога, 0 – норма); $I(\cdot)$ – індикаторна функція; τ – поріг спрацювання.

Конфігурація детектора кодується як хромосома, що одночасно визначає склад ознак, їх ваги та параметри адаптації.

$$C = (B, W, \tau, \rho), \quad (9)$$

де C – хромосома; $B = (b_1, \dots, b_m)$ – бінарна маска ознак; $W = (w_1, \dots, w_m)$ – вектор ваг; τ – поріг тривоги; ρ – коефіцієнт забування в профілі.

Складність моделі вимірюється часткою активних ознак:

$$Complexity(C) = \left(\frac{1}{m}\right) \sum_{j=1}^m b_j, \quad (10)$$

де $Complexity(C) \in [0,1]$ – нормована складність; m – кількість ознак.

Операційна стабільність сигналів фіксується через мінливість потоку тривог. Нехай U – множина користувачів, а $A(k)$ – кількість тривог у вікні k :

$$A(k) = \sum_{u \in U} y_u(k). \quad (11)$$

Для інтервалу оцінювання довжини T вводиться коефіцієнт варіації потоку тривог як міра нестабільності:

$$CV_{alert}(C) = \frac{\sigma(A)}{\bar{A} + \varepsilon}, \quad (12)$$

де $CV_{alert}(C)$ – відносна волатильність потоку тривог; \bar{A} і $\sigma(A)$ – відповідно середнє та стандартне відхилення послідовності $\{A(1), \dots, A(T)\}$; $\varepsilon > 0$ – мала константа.

Функція пристосованості задає компроміс між якістю виявлення та експлуатаційними штрафами. Оскільки постановка роботи не передбачає «тотальної переваги» за всіма метриками, цільова функція прямо карає хибні тривоги, нестабільність сигналів і надмірну складність.

$$Fitness(C) = F1(C) - \alpha FPR(C) - \beta CV_{alert}(C) - \gamma Complexity(C), \quad (13)$$

де $Fitness(C)$ – значення пристосованості; $F1(C)$ – F1-міра, обчислена на валідаційному інтервалі для конфігурації C ; $FPR(C)$ – частка хибнопозитивних спрацювань; $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ – коефіцієнти ваг штрафів, що задають політику компромісу залежно від вартості реагування в організації.

Інтерпретованість забезпечується тим, що скор є лінійною композицією внесків окремих ознак. Для кожної ознаки визначається внесок у конкретне спрацювання:

$$contrib_{uj}(k) = b_j w_j d_{uj}(k). \quad (14)$$

Експерименти виконано на публічному наборі журналів CLUE-LDS [2], який містить події реальних кількох тисяч анонімізованих користувачів. Для відтвореного оцінювання аномальні події додаються штучно: після певного моменту події, що приписуються користувачу u , замінюються на статистично більше схожі на інший профіль. Така постановка добре узгоджується з прикладною UEBA-логікою: на практиці аналітика цікавить стійке зміщення звичного профілю, яке підвищує ризик інциденту, а не аномальна подія як така [1].

Базові методи відбиралися так, щоб покривати типові класи UEBA-рішень: (i) статистичний скоринг на основі нормалізованих відхилень без оптимізації ваг; (ii) однокласові та ансамблеві моделі для виявлення аномалій у векторному представленні; (iii) двоступеневий підхід із грубим відбором кандидатів і деталізацією лише для підозрілих фрагментів, що відображає ідею «coarse-to-fine» у поведінковій аналітиці [3]. Окремо контролювався вплив **само еволюційної оптимізації**: як референс розглядалася конфігурація з тим самим набором ознак, але з фіксованими вагами та порогом, підібраним традиційною валідацією без пошуку по підмножинах.

Запропонований метод оптимізував хромосому $C = (B, W, \tau, \rho)$, де B задає підмножину активних ознак, W – їх ваги, τ – поріг тривоги, ρ – параметр забування. Генетичний алгоритм налаштовувався в режимі помірною бюджету пошуку: популяція 40–60 особин, 25–35 поколінь, турнірний відбір малого розміру, імовірність кросоверу близько 0.8 та мутації на рівні 0.03–0.08.

Дані агрегувалися у добові вікна $\Delta = 1$. Загалом використано 2 400 користувачів та 210 діб спостережень, що дало 504 000 вікон (u, k) . Аномальні епізоди вводилися в 0.4% вікон (2 016 позитивних прикладів), що зберігає характерну для UEBA дисбалансність і робить точність особливо чутливою до хибних тривог [1]. Оцінювання виконано на тестовому відрізку після налаштування порогів і параметрів на попередньому часовому інтервалі.

Таблиця 1

Порівняння запропонованого методу з базовими

Метод	$F1$	FPR	\bar{A}	CV_{alert}	Complexity
Статистичний скоринг (i)	0.058	0.028	84	0.62	1.00
Однокласова модель у векторному просторі (ii)	0.063	0.025	76	0.60	1.00
Двоступеневий coarse-to-fine пайплайн (iii)	0.075	0.019	58	0.52	0.85
ГА-оптимізація B, W, τ, ρ	0.093	0.013	41	0.39	0.35

У таблиці 1 наведено результати порівняння з базовими методами. Порівняно з двоетапним coarse-to-fine пайплайном без еволюційної оптимізації $F1$ зростає лише з 0.075 до 0.093, що є незначним покращенням. Натомість у тих показниках, які визначають реальну вартість експлуатації UEBA-детектора, перевага більш виражена. Частка хибнопозитивних спрацювань зменшується з 0.019 до 0.013, тобто приблизно на 32% у відносному вимірі, а волатильність потоку тривог за коефіцієнтом варіації падає з 0.52 до 0.39, що відповідає близько 25% відносного зниження. Середня кількість тривог на добу зменшується з 58 до 41, отже навантаження на аналітиків стає нижчим і більш прогнозованим.

Для базових підходів *Complexity* рівна одиниці, що означає використання всього простору ознак або близького до нього підпростору. У запропонованому методі *Complexity* становить 0.35, тобто активно залишається приблизно третина ознак. Зменшення розмірності поведінкового профілю спрощує пояснення спрацювань і знижує ризик того, що система почне реагувати на короточасні або контекстно нестійкі сигнали, продукуючи зайві тривоги.

Отримані результати пояснюються структурою оптимізації. Еволюційний пошук по масці B усуває ознаки, які виявляються надто варіативними або слабо пов'язаними з аномальними подіями. На практиці саме такі нестійкі ознаки часто є джерелом хвиль хибних тривог при зміні ролей, інструментів чи процесів. Зменшення FPR та \bar{A} демонструє що відбір компактнішого підпростору ознак знижує шанс інтерпретації короточасних організаційних коливань як інцидентів.

Оптимізація ваг W та порогу τ дозволяє зменшити CV_{alert} , тобто кількість тривог у часових відрізках коливається менше, а навантаження на аналітиків рівномірнішим. Для великих організацій зменшення різких піків у потоці сигналів покращує процес реагування. Скорочення *Complexity* знижує обчислювальне навантаження, що особливо корисно в системах із великим числом користувачів. Компактна конфігурація підсилює пояснюваність, це, в свою чергу, зменшує час на формування гіпотези щодо природи тривоги аналітиком.

Водночас варто наголосити що сценарій аномалій формується контрольованим додаванням змін профілю і абсолютні значення метрик відображають саме цей клас відхилень і не гарантують аналогічних результатів для всіх типів зловмисної активності.

Висновки. Для UEBA в корпоративних середовищах ключовою є експлуатаційна придатність у присутності дрейфу поведінки, дисбалансу та контекстної неоднорідності. Це перетворює задачу на пошук керованого компромісу між якістю виявлення, відсіканням шумів і складністю моделі.

Запропонований підхід формалізує поведінкове профілювання як потоковий механізм, де піщення приймається на основі зваженого скору $S_u(k)$. Новизна реалізована в тому, що конфігурація детектора $C = (B, W, \tau, \rho)$ не задається вручну й не фіксується-

ся раз і назавжди, а підбирається еволюційно з урахуванням штрафів за хибні тривоги, нестабільність сигналів і надмірну розмірність.

Експеримент на CLUE-LDS із контрольованим введенням аномальних подій продемонстрував найбільш відчутний ефект генетичного методу саме в показниках, які визначають операційну корисність. Згідно з таблицею 1, приріст за $F1$ є помірним, але частка хибнопозитивних спрацювань зменшується з 0.019 до 0.013, волатильність потоку тривог CV_{alert} – з 0.52 до 0.39, а середнє добове навантаження \bar{A} – з 58 до 41. Паралельно істотно знижується складність конфігурації до приблизно третини початкового простору ознак, що забезпечує пояснюваність. Підхід демонструє перевагу як інструмент зменшення шуму та вирівнювання потоку тривог при збереженні рівня якості виявлення.

Принцип формування датасету і проведення експерименту не гарантує аналогічного ефекту для коротких високоризикових дій або складних багатоетапних кампаній. Практичним продовженням роботи є перевірка методу на ширшій палітрі сценаріїв, а також інтеграція обчислювальних обмежень та ресурсу аналітиків на реагування у вигляді явних SLA-порогів у функції пристосованості, щоб забезпечити відтворений перехід від експериментального налаштування до промислової експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kamatchi K., Uma E. Insights into user behavioral-based insider threat detection: systematic review // *International Journal of Information Security*. 2025. Vol. 24. Art. 88. DOI: 10.1007/s10207-025-01002-6.
2. Landauer M., Skopik F., Höld G., Wurzenberger M. A User and Entity Behavior Analytics Log Data Set for Anomaly Detection in Cloud Computing // *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data): 6th International Workshop on Big Data Analytics for Cyber Intelligence and Defense (BDA4CID 2022)*. Osaka, Japan, 17–20 Dec. 2022. P. 4285–4294. DOI: 10.1109/BigData55660.2022.10020672.
3. Alzaabi F. R., Mehmood A. A review of recent advances, challenges, and opportunities in malicious insider threat detection using machine learning methods // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 30907–30927. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3369906.
4. Kim J., Park M., Kim H., Cho S., Kang P. Insider threat detection based on user behavior modeling and anomaly detection algorithms // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, No. 19. Art. 4018. DOI: 10.3390/app9194018.
5. Feng W., Cao Y., Chen Y., Wang Y., Hu N., Jia Y., Gu Z. Multi Granularity User Anomalous Behavior Detection // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 1. Art. 128. DOI: 10.3390/app15010128.
6. Mohammed A. S., Kanka V., Selvaraj A. Advanced behavioral analytics for user and entity behavior anomaly detection in hybrid cloud environments // *Cybersecurity and Network Defense Research*. 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://thesciencebrigade.com/ccndri/advanced-behavioral-analytics-for-user-and-entity-behavior-anomaly-detection-in-hybrid-cloud-environments/> (дата звернення: 16.12.2025).

7. Seenivasan S. R., Ganaga Durga M. GA trained classification for behavior based anomaly detection in the MANETS // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10, No. 11. P. 28811–28827.
8. Zhao X., Su H., Sun Z. An intrusion detection system based on genetic algorithm for software defined networks // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 21. Art. 3941. DOI: 10.3390/math10213941.
9. Seyedi B., Postolache O. Securing IoT communications via anomaly traffic detection: Synergy of genetic algorithm and ensemble method // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 13. Art. 4098. DOI: 10.3390/s25134098.
10. Chatterjee A., Ahmed B. S. IoT anomaly detection methods and applications: A survey // *Internet of Things*. 2022. Vol. 19. Art. 100568. DOI: 10.1016/j.iot.2022.100568.
11. Віжевський П. В., Савенко О. С. Еволюційна адаптація політик DLP за умов дрейфу концепції у потокових даних // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. С. 9–19. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.9-19.
12. Sachenko A., Vizhevskiy P., Savenko O., Ostroverkhov V., Maslyyak B. Modern strategies for data leak detection and prevention in corporate networks // *MoDaST 2025: Modern Data Science Technologies Doctoral Consortium*. Lviv, Ukraine, 15 June 2025. P. 275–292. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4005/paper19.pdf>
13. Hinder F., Vaquet V., Hammer B. One or Two Things We Know About Concept Drift – A Survey on Monitoring in Evolving Environments. Part A: Detecting Concept Drift // *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2024. Art. 1330257. DOI: 10.3389/frai.2024.1330257.
14. Shyaa A., Zulkernine M., Abouelela O., Miri A. Comprehensive survey: Concept drift and feature dynamics in intrusion detection systems // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 132. Art. 109143. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109143.
15. Zhu S., Liu Z., Bansal N., Han J., Shah N., Papalexakis E., Faloutsos C. METER: A dynamic concept adaptation framework for online anomaly detection // *Proceedings of the VLDB Endowment*. 2023. Vol. 17, no. 4. P. 794–807. DOI: 10.14778/3636218.3636233.

REFERENCES

1. Kamatchi, K., & Uma, E. (2025). Insights into user behavioral-based insider threat detection: Systematic review. *International Journal of Information Security*, 24, Article 88. <https://doi.org/10.1007/s10207-025-01002-6>.
2. Landauer, M., Skopik, F., Höld, G., & Wurzenberger, M. (2022). A user and entity behavior analytics log data set for anomaly detection in cloud computing. In *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data): 6th International Workshop on Big Data Analytics for Cyber Intelligence and Defense (BDA4CID 2022)* (pp. 4285–4294). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10020672>.
3. Alzaabi, F. R., & Mehmood, A. (2024). A review of recent advances, challenges, and opportunities in malicious insider threat detection using machine learning methods. *IEEE Access*, 12, 30907–30927. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3369906>.
4. Kim, J., Park, M., Kim, H., Cho, S., & Kang, P. (2019). Insider threat detection based on user behavior modeling and anomaly detection algorithms. *Applied Sciences*, 9(19), 4018. <https://doi.org/10.3390/app9194018>.

5. Feng, W., Cao, Y., Chen, Y., Wang, Y., Hu, N., Jia, Y., & Gu, Z. (2025). Multi granularity user anomalous behavior detection. *Applied Sciences*, 15(1), 128. <https://doi.org/10.3390/app15010128>.
6. Mohammed, A. S., Kanka, V., & Selvaraj, A. (2022). Advanced behavioral analytics for user and entity behavior anomaly detection in hybrid cloud environments. *Cybersecurity and Network Defense Research*. <https://thesciencebrigade.com/ccndri/advanced-behavioral-analytics-for-user-and-entity-behavior-anomaly-detection-in-hybrid-cloud-environments/>.
7. Seenivasan, S. R., & Ganaga Durga, M. (2015). GA trained classification for behavior based anomaly detection in the MANETS. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(11), 28811–28827. https://www.ripublication.com/ijaer10/ijaerv10n11_125.pdf.
8. Zhao, X., Su, H., & Sun, Z. (2022). An intrusion detection system based on genetic algorithm for software defined networks. *Mathematics*, 10(21), 3941. <https://doi.org/10.3390/math10213941>.
9. Seyedi, B., & Postolache, O. (2025). Securing IoT communications via anomaly traffic detection: Synergy of genetic algorithm and ensemble method. *Sensors*, 25(13), 4098. <https://doi.org/10.3390/s25134098>.
10. Chatterjee, A., & Ahmed, B. S. (2022). IoT anomaly detection methods and applications: A survey. *Internet of Things*, 19, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100568>.
11. Vizhevskiy, P. V., & Savenko, O. S. (2025). Evolutionary adaptation of DLP policies under concept drift in streaming data. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), Part II, 9–19. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.9-19](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.9-19).
12. Sachenko, A., Vizhevskiy, P., Savenko, O., Ostroverkhov, V., & Maslyyak, B. (2025). Modern strategies for data leak detection and prevention in corporate networks. In *Proceedings of the Modern Data Science Technologies Doctoral Consortium (MoDaST 2025)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4005, pp. 275–292). CEUR-WS.org. <https://ceur-ws.org/Vol-4005/paper19.pdf>.
13. Hinder, F., Vaquet, V., & Hammer, B. (2024). One or two things we know about concept drift—a survey on monitoring in evolving environments. Part A: Detecting concept drift. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 7, Article 1330257. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1330257>.
14. Shyaa, M. A., Ibrahim, N. F., Zainol, Z., Abdullah, R., Anbar, M., & Alzubaidi, L. (2024). Evolving cybersecurity frontiers: A comprehensive survey on concept drift and feature dynamics aware machine and deep learning in intrusion detection systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137, 109143. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109143>
15. Zhu, J., Cai, S., Deng, F., Ooi, B. C., & Zhang, W. (2023). METER: A dynamic concept adaptation framework for online anomaly detection. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 17(4), 794–807. <https://doi.org/10.14778/3636218.3636233>.

Received 15.01.2026.
Accepted 19.01.2026.

Evolutionary adaptation of DLP policies under concept drift in streaming data

In modern streaming DLP systems deployed across cloud and hybrid environments, fixed policies degrade rapidly due to concept drift. Operators must simultaneously control the risk-weighted miss cost, limit the false-alarm burden, meet latency SLOs, and keep alert streams stable under tight memory and compute budgets. These competing objectives are not adequately balanced by traditional detectors or manual policy tuning.

We present an online evolutionary controller that casts policy adaptation as constrained multi-objective optimization. The method uses a chromosome encoding with drift-aware exploration–exploitation switching, an archive of vetted policies for warm starts, a compact active mixture, and guarded rollbacks for operational safety. On six streams (synthetic and real), the controller keeps the integrated cost within 0–3.5% of the best baseline (mean absolute gap $\approx 1.6\%$), sustains p95 latency below 100 ms, and reduces alert-rate volatility by 50–63% while maintaining comparable or lower false-alarm rates.

Two practical sensitivities emerge: the drift-gate threshold governing the exploration/exploitation balance, and short-lived compute bursts immediately after detected changes. Warm starts, a compact mixture, and mutation-budget guards mitigate these effects without sacrificing responsiveness.

Keywords: genetic algorithms, Data Loss Prevention, anomaly detection, concept drift, cloud security

Віжевський Петро Володимирович – асистент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4851-0839>

Савенко Олег Станіславович – професор, д.т.н., професор кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>

Vizhevskiy Petro – teaching asistant of Computer Engineering and Programming Department, Khmelnytskyi National University, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4851-0839>

Savenko Oleg– Professor, Doctor in Information Technology (Doctor of Technical Sciences), Professor of Computer Engineering and Programming Department, Khmelnytskyi National University, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4104-745X>

Є.А. Гаврилюк, В.М. Струков, Д.Ю. Узлов

ІНТЕГРОВАНІЙ АІ-БАЗОВАНИЙ ФРЕЙМВОРК ДЛЯ ЗАДАЧ НЕПЕРЕРВНОГО ПОКРИТТЯ З ГЕОМЕТРИЧНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ

Анотація. У статті розглянуто інтегровану методологію АІ-базованого гібридного фреймворку для розв'язання задачі неперервного покриття з урахуванням геометричних обмежень. Актуальність роботи визначається широким спектром застосувань задач покриття в телекомунікаціях, логістиці, робототехніці, моніторингу територій та простору плануванні, де класичні дискретні моделі є недостатніми через складність реальних географічних областей і необхідність оптимізувати неперервні параметри. Постановка проблеми полягає у створенні методологічного підходу, здатного поєднувати складні геометричні операції, глобальні оптимізаційні процедури та інтелектуальні прогнозні моделі для підвищення ефективності обчислень. Метою дослідження є формування єдиного гібридного фреймворку, який інтегрує метаевристичні та меметичні методи оптимізації з нейромережевими surrogate-моделями та UML-орієнтованою архітектурою інформаційної системи. Запропоновані методи включають ройові та еволюційні алгоритми, адаптивні штрафні механізми, нейронні апроксимаційні моделі та комбіновані підходи до оцінки площі покриття. Результати дослідження представлено у вигляді концептуального порівняння ефективності різних компонентів фреймворку та їх синергетичного впливу на точність і швидкодю оптимізації. Висновки підкреслюють придатність інтегрованого АІ-фреймворку до масштабних задач покриття та його потенціал для подальшого розвитку у напрямі динамічних та багатокритеріальних постановок.

Ключові слова: неперервне покриття, просторове моделювання, ройова оптимізація, меметичні алгоритми, штучний інтелект, UML-архітектура.

Вступ. Задачі оптимального геометричного покриття належать до фундаментальних проблем розміщення об'єктів у прикладній математиці та операційному дослідженні. Вони виникають у найрізноманітніших прикладних контекстах: від проектування логістичних мереж, розміщення медичних і сервісних центрів, побудови сенсорних та телекомунікаційних інфраструктур до планування маршрутів безпілотних апаратів, моніторингу довкілля, надзвичайних ситуацій і просторового аналізу в GIS-системах. У всіх цих випадках розв'язується спільна за суттю задача – як розташувати обмежену кількість об'єктів або ресурсів так, щоб забезпечити максимально можливе охоплення заданої області або регіонів попиту з урахуванням реальних обмежень.

Перехід від класичних дискретних моделей покриття до неперервних постановок зумовлений необхідністю врахування складної геометрії областей, наявності заборонених зон, орієнтованих і анізотропних форм зон обслуговування, а також регіональної неоднорідності попиту. На відміну від ідеалізованих сіткових моделей, неперервні задачі покриття працюють з реальними картографічними об'єктами, полігонами довільної форми та комбінованими геометричними обмеженнями. Це призводить до виникнення негладких, багатоекстремальних і обчислювально дорогих цільових функцій, що істотно обмежує придатність класичних градієнтних та комбінаторних методів.

У низці прикладних сфер, зокрема в логістиці та транспорті, оборонних застосуваннях, робототехніці, бездротових сенсорних мережах та системах моніторингу, додаткові вимоги висуваються до стійкості та масштабованості моделей. Там важливими є не лише максимальна площа покриття, а й врахування зон ризику, обмежень доступності, надмірності та відмовостійкості. Наприклад, у логістичних системах покриття може інтерпретуватися як досяжність клієнтів з обмеженнями за часом доставки; в оборонних задачах - як забезпечення спостереження або контролю територій із заборонаю розміщення засобів у певних зонах; у робототехніці - як гарантоване відвідування та скасування ділянок за заданий час; у сенсорних мережах - як повнота і надійність спостережень із врахуванням обмежених енергетичних ресурсів.

Поєднання складної геометрії, багатовимірних просторів параметрів та високої вартості обчислення цільової функції природно веде до застосування метаевристичних підходів, насамперед ройових та меметичних алгоритмів. Вони добре пристосовані до глобального пошуку в нерегулярних ландшафтах і дозволяють отримувати високоякісні наближені розв'язки там, де строгі оптимізаційні методи стають непрактичними. Паралельно з цим активно розвиваються нейромережеві технології, які можуть виступати сурогатними моделями для наближення цільової функції, а також інструментами автоматичного налаштування штрафних функцій у задачах з обмеженнями, забезпечуючи істотне прискорення обчислень і підвищення стабільності пошуку.

Не менш важливою є інженерна складова: для того щоб математичні моделі покриття перетворилися на практично корисні інструменти, потрібні спеціалізовані інформаційні технології, здатні інтегрувати геометричні обчислення, оптимізаційні модулі, нейромережеві компоненти та інтерфейси до джерел просторових даних. Використання формальних підходів до проектування архітектури, зокрема UML-орієнтованого моделювання, дає змогу побудувати модульні, масштабовані системи, у яких легко поєднувати різні методи оцінювання покриття та алгоритми оптимізації.

У цій статті розглядається інтегрований AI-базований фреймворк для задач неперервного покриття з геометричними обмеженнями, який поєднує ройові й меметичні методи оптимізації, нейромережеві підходи до сурогатного моделювання та адаптивних штрафних функцій, а також UML-орієнтоване моделювання архітектури інформаційної системи. Метою роботи є узагальнити низку існуючих підходів у єдиній методичній рамці, показати їхню взаємодію та окреслити можливості практичного застосування в задачах логістики, оборонних систем, робототехніки, сенсорних мереж та моніторингу,

створюючи основу для подальших досліджень у динамічних і багатокритеріальних постановках задач покриття.

Аналіз літературних джерел. Класичні постановки задачі максимального покриття були сформульовані в дискретному вигляді як задача розміщення об'єктів для максимізації покриття точок попиту у роботі [1], де вводяться базові поняття області попиту та радіуса покриття. Подальший розвиток привів до неперервних формулювань, у яких область покриття розглядається як підмножина евклідового простору, а об'єкти обслуговування можуть змінювати положення та інші параметри в неперервному просторі. Узагальнений огляд моделей безперервного максимального покриття, включно з питаннями формулювання, класифікації та обчислювальної складності, наведено у роботі [2], де підкреслюється важливість переходу до геометрично узгоджених моделей.

Сучасні дослідження зосереджені на задачах покриття зі складною геометрією області та зон обслуговування. У роботі [3] запропоновано підхід на основі напівнескінченної оптимізації для задач безперервного покриття й покриття, де множини визначаються як підмножини евклідового простору з нескінченною кількістю обмежень; показано, що такий підхід дозволяє будувати точні методи для частини безперервних задач покриття. Роботи [4–6] розвивають концепцію використання програмних засобів обчислювальної геометрії для моделювання задач пакування та покриття, формалізації неперервних моделей максимального покриття та їх розв'язання з використанням нелінійної оптимізації. Зокрема, у [5, 6] розглядаються моделі з довільною формою зон обслуговування, регіональною неоднорідністю попиту та забороненими зонами, що наближає математичні постановки до реальних сценаріїв застосування.

Загалом ці роботи демонструють, що неперервні задачі покриття з реалістичною геометрією та складними обмеженнями залишаються обчислювально складними, навіть якщо використовуються просунуті методи напівнескінченної оптимізації чи спеціалізовані геометричні алгоритми. Це мотивує активне застосування метаевристичних методів, здатних працювати з негладкими, багатоекстремальними цільовими функціями, а також потребу в інформаційних технологіях, які підтримують інтеграцію геометричних та оптимізаційних компонентів.

У задачах неперервного покриття цільова функція зазвичай має складну форму: численні локальні максимуми, плато, негладкі ділянки, спричинені перетином і об'єднанням геометричних областей. У таких умовах ройові та еволюційні метаевристичні природно підходять для пошуку наближених оптимумів. Одним із базових методів є оптимізація роєм частинок (PSO), запропонована у [7], що забезпечує простий механізм балансування між дослідженням і експлуатацією завдяки поєднанню інерційного руху, “особистого досвіду” та “соціального притягання”. Інший ройовий алгоритм Fish School Search (FSS) моделює колективну поведінку рибної зграї та завдяки поєднанню індивідуального, інстинктивного і колективного рухів добре працює у складних та обмежених просторах [8]. Ще одним поширеним природо-орієнтованим методом, який показав ефективність у задачах неперервної оптимізації, є алгоритм світлячків (Firefly

Algorithm, FA), запропонований у [9]. FA моделює притягання між агентами на основі інтенсивності «світіння», що відповідає значенню цільової функції. Рівень притягання визначається параметром поглинання, який контролює радіус дії кожного агента.

Широко дослідженим є алгоритм штучних бджіл (Artificial Bee Colony, ABC), що розглядає популяцію рішень як бджолину колонію; він відзначається гнучким поєднанням локального пошуку зайнятих бджіл і глобальної розвідки, що здійснюється розвідницями [10]. Огляд сучасних модифікацій ABC, включно з адаптивними параметрами та механізмами локального вдосконалення, подано в узагальнювальних роботах, де підкреслюється ефективність алгоритму в задачах неперервної оптимізації та комбінованих задачах [10].

Окремий напрям пов'язаний з меметичними алгоритмами, у яких глобальний ройовий або еволюційний пошук поєднується з локальним детермінованим вдосконаленням. У [11] систематизовано підходи до меметичних методів та їх різновиди; наголошено, що їхня ефективність значно зростає в задачах, де важлива точність локального рішення після грубого глобального пошуку. У роботі [12] запропоновано меметичні алгоритми для неперервної оптимізації на основі “ланцюгів локальних пошуків”, які дозволяють гнучко налаштовувати глибину та частоту локальної оптимізації. Така стратегія є особливо перспективною для геометричних задач покриття, де ройовий компонент відповідає за знаходження перспективних конфігурацій, а локальний метод (наприклад, BFGS) за точне доопрацювання положень і орієнтацій об'єктів покриття.

Висока обчислювальна вартість оцінювання площі покриття у задачах з довільною геометрією робить доцільним використання сурогатних моделей. Класичні підходи до surrogate-моделювання, зокрема на основі Крігінга, поліноміальних апроксимацій та радіальних базисних функцій, викладено в монографії [13]. У ній описуються методи побудови наближених моделей цільових функцій, які дозволяють суттєво скоротити кількість дорогих обчислень.

Сучасні тенденції зміщуються у бік data-driven еволюційної оптимізації, де сурогати будуються із залученням глибоких нейронних мереж. У роботі [14] подано огляд поєднання еволюційних алгоритмів із даними, включно з активним навчанням і адаптивним вибором точок для уточнення моделі. Особливий інтерес для задач покриття мають архітектури Deep Sets [15], які забезпечують інваріантність до перестановок елементів; це дозволяє коректно працювати з множинами об'єктів покриття змінного розміру, що природно відповідає конфігураціям сенсорів або зон обслуговування.

Фізико-інформовані нейронні мережі (Physics-Informed Neural Networks, PINNs), запропоновані у [16], демонструють підхід до поєднання аналітичних закономірностей із даними для побудови багато-фідельних моделей; хоча первісно вони орієнтовані на диференціальні рівняння, загальна ідея є перспективною і для геометричних задач, де можна враховувати відомі структурні властивості покриття. У сукупності ці роботи формують підґрунтя для застосування нейросурогатів і нейронно-керованих штрафних функцій у задачах неперервного покриття.

У більшості сучасних застосувань задачі покриття реалізуються як частина комплексних інформаційних систем, що працюють із просторовими даними, базами даних,

сервісами моделювання та візуалізації. Важливою складовою є використання стандартів моделювання програмних систем, зокрема UML, який регламентує опис структурних і поведінкових аспектів архітектури [17]. UML-підхід дозволяє формально визначати модулі геометричних обчислень, оптимізаційні компоненти, нейромережеві підсистеми, а також інтерфейси з GIS, сервісами візуалізації та зовнішніми аналітичними модулями.

З технічного боку, практична реалізація неперервних моделей покриття активно спирається на бібліотеки обчислювальної геометрії, зокрема Shapely [18], а також засоби роботи з просторовими даними типу GeoPandas та інші бібліотеки для Python. Це дозволяє виконувати точні операції над багатокутниками та іншими геометричними об'єктами, інтегрувати покриття з реальними картографічними даними та проводити просторовий аналіз.

Щодо застосувань, задачі покриття є ключовими для бездротових сенсорних мереж, де оптимізація розміщення вузлів спрямована на забезпечення достатнього покриття, зв'язності та енергоефективності [19]. У робототехніці покриття використовується для планування траєкторій роботів для обстеження територій, картографування, інспекції та сервісного обслуговування; огляд результатів із coverage robotics наведено в [20]. У сфері бізнес-аналітики та вибору місць розташування об'єктів сервісу застосовуються моделі максимального покриття з урахуванням попиту, транспортної доступності та обмежень середовища [21].

При моніторингу довкілля та надзвичайних ситуацій задачі покриття виникають при проектуванні систем моніторингу пожеж, забруднень, техногенних інцидентів, де необхідно забезпечити надійне покриття територій сенсорними мережами, з урахуванням можливих відмов та множинних ризиків. У таких сценаріях важливим є не лише досягнення максимальної площі покриття, але й забезпечення надмірності, стійкості та працездатності системи в умовах часткових відмов. Це додатково підкреслює потребу в інтегрованих фреймворках, які поєднують методи оптимізації, нейромережевих сурогатів і формальних архітектурних рішень для побудови масштабованих, надійних інформаційних технологій.

Формальна постановка задачі. Неперервна задача максимального покриття формулюється таким чином. Задана компактна множина $\Omega \subset R^2$, яка представляє собою область, що підлягає покриттю. Геометрія Ω може бути довільною: багатокутником, множиною з отворами, нерегулярною областю або комбінацією простих геометричних фрагментів. Нехай задано множину n об'єктів покриття S_1, \dots, S_n , де кожний об'єкт $S_i \subset R^2$ є компактною множиною фіксованої форми та розмірів (еліпс, прямокутник, полігон, складний об'єкт тощо).

Положення кожного об'єкта S_i в просторі R^2 визначається параметрами розміщення $p_i = (x_i, y_i, \theta_i)$, що задаються вектором трансляції (x_i, y_i) та кутом повороту $\theta_i \in [0, 2\pi)$.

Зафіксуємо положення області покриття $\Omega \subset R^2$, задавши її параметри розміщення $p_0 = (0, 0, 0)$. Після трансформації (трансляції та повороту) об'єкта S_i отримуємо параметризований об'єкт $S_i(p_i)$.

Сформуємо складний параметризований об'єкт, що назвемо конфігурацією покриття:

$$\tilde{\Omega}(\mathbf{p}) = \Omega(0) \cap \bigcup_{i=1}^n S_i(p_i), \quad (1)$$

де $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n) = (x_1, y_1, \theta_1, \dots, x_n, y_n, \theta_n)$.

Площа конфігурації покриття (1) визначається як площа перетину області $\Omega(0)$ з об'єднанням трансформованих об'єктів $S_i(p_i)$, $i = 1, \dots, n$:

$$F(\mathbf{p}) = \mu(\tilde{\Omega}(\mathbf{p})) = \text{area} \left(\Omega(0) \cap \bigcup_{i=1}^n S_i(p_i) \right). \quad (2)$$

Функція $F(\mathbf{p})$ є негладкою, може мати розриви та різку зміну градієнтів, оскільки залежить від геометричних перетинів і часткових накладань.

Метою оптимізації є максимізація цієї функції:

$$\max_{\mathbf{p} \in W} F(\mathbf{p}),$$

де W - множина допустимих параметрів розміщення покриваючих об'єктів.

Укажемо деякі найпоширеніші обмеження на параметри розміщення покриваючих об'єктів W . Нехай задано k заборонених зон Z_1, \dots, Z_k , $Z_i \subset R^2$, які визначають області, в яких не можна розташовувати центри об'єктів, але які можуть бути покриті самими об'єктами.

Формально маємо:

$$(x_i, y_i) \notin Z_j \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, k. \quad (3)$$

Такі обмеження є суттєвим у сценаріях, коли вимагається розміщення сенсорів поза небезпечними зонами, встановлення базових станцій поза житловими секторами, розміщення мобільних пунктів в безпечних місцях при максимальному охопленні.

Для застосування метаевристик та AI-орієнтованих методів часто використовують штрафне представлення, яке переводить задачу умовної оптимізації в безумовну форму:

$$\max (F(\mathbf{p}) - \rho P(\mathbf{p})), \quad (4)$$

де $\rho > 0$ штрафний коефіцієнт, а штрафну функцію $P(\mathbf{p})$ задаємо як

$$P(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \max(0, Z_j(x_i, y_i))^2.$$

У подальшому допустимо замінювати жорсткі штрафи на адаптивні, нейронні оцінки штрафів, проєкційні оператори, комбіновані схеми.

Особливості задачі (4) та складнощі оптимізації виникають через геометричну природу. Операції об'єднання і перетину множин мають високу обчислювальну склад-

ність, особливо при десятках і сотнях об'єктів. Негладкість та багатоекстремальність функції (2) пов'язана з тим, що різні розташування об'єктів можуть давати приблизно однакове покриття, існують комбінаційні конфігурації, де об'єкти накладаються або «розходяться» на окремі сегменти.

Кількість змінних задачі (4) дорівнює $3n$, що робить її надскладною вже при $n > 20$.

Оптимальний розв'язок задачі (4) залежить як від координат, так і від кутів, а також від взаємних накладань і топології області. З цих причин у подальших розділах розглядаються ройові та еволюційні методи глобального пошуку, меметичні комбінації з локальними оптимізаторами, сурогатне моделювання функції покриття, UML-орієнтована архітектура для модульної реалізації системи.

Метаевристичні алгоритми оптимізації. Задача неперервного покриття характеризується високою розмірністю простору параметрів, негладкою і багатоекстремальною цільовою функцією, складними геометричними операціями (перетини, обертання, трансформації об'єктів) та наявністю заборонених зон. У таких умовах класичні детерміновані методи, що базуються на градієнтній інформації або регулярності цільової функції, втрачають ефективність. Значно кращі результати демонструють популяційні метаевристичні, здатні виконувати глобальний пошук у складних геометричних просторах.

Ключовою особливістю використання ройових алгоритмів у задачах покриття є те, що кожен агент алгоритму представляє повну конфігурацію об'єктів покриття (2), тобто вектор параметрів $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n) = (x_1, y_1, \theta_1, \dots, x_n, y_n, \theta_n)$, який визначає положення та орієнтацію всіх об'єктів.

Таким чином, рух агентів у просторі рішень відповідає геометричній перебудові структури покриття. Це дозволяє інтерпретувати параметри метаевристичних не лише в абстрактному пошуковому сенсі, а як механізми керування геометрією покриття.

Нижче розглянуто основні популяційні алгоритми та їхні геометричні інтерпретації.

Particle Swarm Optimization (PSO) [7]. У PSO кожна частинка це повна конфігурація покриття. Швидкість частинки визначає, наскільки агресивно трансформуються об'єкти $S_i(p_i)$, $i = 1, \dots, n$. Великі компоненти швидкості призводять до значних переміщень та поворотів, а малі – до плавної, стабільної перебудови покриття. Основні параметри PSO мають чіткий геометричний зміст. Інерційний коефіцієнт визначає інерцію конфігурації: великі значення призводять до збереження напрямку руху, а малі до різкої перебудови. Когнітивний коефіцієнт відповідає за локальні корекції об'єктів покриття на основі власних вдалих положень. Соціальний коефіцієнт спрямовує конфігурацію до тієї, що дала найбільшу площу покриття. Таким чином, PSO діє як глобальний механізм перебудови всієї системи розміщення, плавно або різко адаптуючи структуру залежно від параметрів.

Fish School Search (FSS) [8]. У FSS кожна "риба" також є конфігурацією покриття. Три основні оператори мають геометричне тлумачення. Індивідуальний рух відповідає

локальному зсуву та обертанню елементів покриття тобто невеликих змін параметрів розміщення $p_i = (x_i, y_i, \theta_i)$). Інстинктивний рух задає усереднення успішних змін відображає узгоджену перебудову розміщення об'єктів, спрямовану на збільшення покриття важливих ділянок області. Колективне стискання/розширення: визначає масштаб трансформацій: розширення призводить до активного дослідження нових геометричних конфігурацій, а стискання до фіксації перспективної топології покриття. FSS є природно адаптивним до складних геометрій області $\Omega \subset R^2$ та наявності заборонених зон.

Firefly Algorithm (FA) [9]. У FA інтенсивність світіння агентів відповідає площі покриття. Алгоритм має чітку інтерпретацію: притягання до яскравих агентів відповідає руху до конфігурацій з кращим розташуванням об'єктів. Основним параметром в алгоритмі є параметр поглинання γ , що визначає окіл дії геометричних трансформацій. Мале γ призводить до “далеких стрибків” у просторі покриття, а велике γ - до дрібної точкової корекції положень і орієнтацій об'єктів. FA добре працює з мультимодальними геометріями, але потребує тонкого налаштування параметрів.

Artificial Bee Colony (ABC) [10]. Три типи бджіл визначають різні аспекти корекції покриття. Зайняті бджоли контролюють локальні деформації конфігурацій, що відповідає точковим змінам окремих об'єктів. Спостерігачі відповідальні за вибір найкращих конфігурацій і дрібні модифікації орієнтацій/положень. Розвідницькі бджоли забезпечують повний перезапуск частини популяції, тобто генерація нових геометричних структур покриття, що важливо при складних обмеженнях. ABC демонструє сильну здатність до пошуку нових конфігурацій та подолання локальних мінімумів.

Широкий спектр поведінкових механізмів різних метаевристик дозволяє їм порізному взаємодіяти з геометрією покриття.

Таблиця 1 узагальнює ключові властивості кожного підходу та надає порівняльну характеристику ройових алгоритмів у неперервних задачах максимального покриття

Таблиця 1

Алгоритм	Глобальний пошук	Стійкість до локальних мінімумів	Орієнтовна якість покриття	Швидкість	Особливості
PSO	Висока	Середня	Базова	Висока	Швидка збіжність, ризик втрати різноманіття
FSS	Висока	Висока	Вища за PSO	Середня	Адаптивність до складної геометрії області
FA	Середня	Середня	Подібна до PSO	Середня-низька	Чутливість до параметра поглинання
ABC	Середня	Висока	Деяко вища за PSO	Низька	Механізми перезапуску покращують вихід із локальних мінімумів

Меметичні (гібридні) алгоритми [11]. На відміну від «чистих» ройових чи еволюційних методів, меметичний підхід інтегрує глобальний стохастичний пошук (PSO, FSS, ABC або еволюційні алгоритми), локальну оптимізацію (BFGS, Nelder–Mead, Powell тощо).

Локальна оптимізація використовується як інтенсивний пошук для доведення перспективних рішень, тоді як ройовий метод продовжує дослідження простору на глобальному рівні. Це дає кілька важливих ефектів. По перше, точне геометричне “доведення” рішень. Локальні методи безпосередньо працюють з параметрами розташування та орієнтації об’єктів покриття $p = (p_1, \dots, p_n) = (x_1, y_1, \theta_1, \dots, x_n, y_n, \theta_n)$. Вони дозволяють точно позиціонувати об’єкти, мінімізувати небажані перекриття, покращувати узгодження з межами області, коригувати порушення обмежень. Тобто глобальний алгоритм “наближає” конфігурацію до добре покритої зони, а локальний покращує її.

По-друге, вихід із локальних пасток. Ройові методи добре виконують глобальний пошук, але можуть застрягати поблизу плато або структурних розривів цільової функції. Вбудований локальний оптимізатор дозволяє швидко розкидувати частинки, що зійшлися на неправдивому максимумі, досліджувати круті геометричні особливості (кутові точки, межі заборонених зон), підвищувати стабільність загального алгоритму.

По-третє, прискорення збіжності. Як зазначено у [12], комбінування глобального та локального пошуку (особливо у формі «локальних ланцюгів») різко скорочує кількість ітерацій та покращує якість рішень у складних неперервних задачах.

Геометричний сенс меметичних алгоритмів у покритті простий. Глобальна фаза формує структурно правильну конфігурацію об’єктів. Локальна фаза усуває дрібні неузгодженості, знаходить оптимальні кути поворотів, точні позиції та покращує ефективність перекриття. Це особливо корисно при використанні об’єктів складної форми (еліпси, полігони, несиметричні області покриття), де взаємодія орієнтацій та позицій створює складні багатоекстремальні ландшафти.

У таблиці 2 наведені узагальнені властивості меметичних модифікацій ройових алгоритмів.

Таблиця 2

Алгоритм	Якість рішень	Стабільність	Обчислювальні витрати	Коментар
PSO + BFGS	Підвищена	Висока	Незначні	Сильний баланс глобального й локального пошуку
FSS + BFGS	Підвищена	Дуже висока	Низькі	Стійкість до складних геометрій та заборонених зон
FA + BFGS	Помірно підвищена	Середня	Середні	Поліпшує збіжність FA
ABC + BFGS	Підвищена	Висока	Помірні	Ефективний при необхідності частоті реініціалізації рішень

Таким чином, завдяки природній придатності до роботи з негладкими, фрагментованими та геометрично складними просторами конфігурацій, ройові та меметичні алгоритми є потужним інструментом у задачах неперервного покриття. Їхні параметри та оператори мають чітку геометричну інтерпретацію, що дозволяє розглядати процес оптимізації як еволюційну перебудову структури покриття. Меметичні модифікації значно підвищують точність та стабільність рішень, зберігаючи при цьому прийнятну обчислювальну складність.

Нейромережеві підходи у задачах покриття. Нейронні мережі відіграють ключову роль у сучасних методах розв’язання задач неперервного покриття, де обчислення площі покриття та перевірка обмежень є найбільш витратними компонентами оптимізації. Зростання складності геометрії області $\Omega \subset R^2$, довільні форми об’єктів покриття та наявність заборонених зон створюють ситуацію, коли кожна оцінка цільової функції вимагає значних обчислювальних ресурсів. Для подолання цих обмежень застосовуються дві основні нейромережеві технології: сурогатне моделювання площі покриття та нейронно-керовані адаптивні штрафні функції.

Сурогатне моделювання площі покриття. Оцінка функції покриття (4) вимагає виконання операцій об’єднання та перетину складних геометричних множин, які часто реалізуються засобами обчислювальної геометрії (наприклад, бібліотекою *Shapely*). Повторення цих обчислень у кожній ітерації ройового або меметичного алгоритму робить процес оптимізації повільним і важким до масштабування.

Для прискорення пропонується використовувати нейронні сурогати, які апроксимують значення $F(\mathbf{p})$ на основі попередніх точних обчислень. Така модель приймає параметри розміщення $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n) = (x_1, y_1, \theta_1, \dots, x_n, y_n, \theta_n)$ і повертає швидко оцінку покриття.

Ефективна архітектура на основі принципу Deep Sets: коректно працює з множинами змінного розміру та не залежить від порядку об’єктів, дозволяє кодувати кожний об’єкт покриття окремо, а потім агрегувати інформацію перед фінальним прогнозом; зберігає інваріантність до перестановок та масштабування області.

Такі моделі забезпечують: прискорення оцінок у 10–50 разів завдяки перенесенню більшості викликів із *Shapely* у нейромережевий інференс; можливість виконувати глобальні пошуки на великих популяціях, зменшуючи кількість точних обчислень до 5–10% від загального числа; покращену стабільність оптимізації, оскільки сурогатна модель згладжує нерегулярні фрагменти цільової функції.

Для забезпечення високої точності застосовується мультифідельний підхід, коли на ранніх етапах оптимізації оцінки виконуються нейросурогатом, а для найкращих рішень проводиться уточнення точними геометричними методами.

Нейронно-керовані адаптивні штрафні функції. У задачах покриття з обмеженнями критично важливо контролювати порушення типу (3), тобто заборону розташовувати центри об’єктів у визначених зонах. Класичні штрафні функції вимагають ручного вибору коефіцієнтів. Надто малий штраф допускає порушення, а надто великий руйнує процес оптимізації через жорсткі градієнти.

Використання нейронної мережі для керування штрафом дозволяє автоматично адаптувати штрафи залежно від стану пошуку. Мережа навчається передбачати, як зміна штрафу вплине на прогрес оптимізації.

При цьому немає необхідності ручного підбору параметрів, оскільки штрафна функція стає частиною оптимізаційного процесу, а не зовнішнім фіксованим елементом.

Такий підхід забезпечує баланс між пошуком і дотриманням обмежень. Якщо конфігурація систематично порушує обмеження, то мережа збільшує штраф. Якщо алгоритм застрягає у локальному мінімумі, то мережа частково зменшує штраф, дозволяючи дослідити нові області. Фактично, нейронна мережа формує динамічну карту чутливості, яка співвідносить значення штрафу зі складністю топології області Ω / Z .

Інтеграція з ройовими та меметичними алгоритмами. Комбінація нейросурогатів і адаптивних штрафів створює багаторівневу архітектуру оптимізації, у якій:

- ройові алгоритми (PSO, FSS, ABC) виконують глобальний пошук у просторі геометричних параметрів;
- нейросурогат забезпечує швидку та гладку оцінку покриття, прискорюючи пошук;
- меметичні компоненти (локальні оптимізатори) уточнюють найкращі знайдені конфігурації;
- нейронний штрафний модуль гарантує дотримання просторових обмежень без втрати можливості досліджувати нові стратегії розміщення.

Така інтеграція дозволяє ефективно працювати із задачами з декількома сотнями параметрів, здійснювати оптимізацію на нерегулярних та складних геометріях, отримувати високоякісні конфігурації навіть у випадках, де точний розв'язок обчислити неможливо. Отже, нейромереві технології є фундаментальним компонентом сучасних методів оптимізації задач покриття. Вони дозволяють знизити обчислювальну складність оцінювання цільової функції, автоматично адаптувати штрафи у задачах з обмеженнями, підвищити якість і стабільність пошуку, масштабувати моделі до великих об'єктів та складних форм.

Таким чином, поєднання нейросурогатів, адаптивних штрафних функцій і ройових алгоритмів формує ефективну інтелектуальну рамку для розв'язання задач неперервного покриття у реальних просторових сценаріях.

UML-орієнтоване моделювання архітектури фреймворку для задач неперервного покриття. Для побудови інтегрованої інформаційної технології, яка підтримує задачі неперервного покриття, потрібна формальна архітектура, здатна поєднати геометричні модулі, оптимізаційні алгоритми, нейромереві компоненти та засоби просторової інтеграції. Ефективним інструментом для опису такої архітектури є UML, який забезпечує уніфіковане відображення структурних і функціональних характеристик системи.

В основі нашого підходу покладені два ключові аспекти UML-моделювання - функціональна структура системи та її внутрішня модульна організація. Хоча UML-діаграми не подаються у статті графічно, текстовий опис відображає їх зміст і логіку.

Функціональна структура системи (концепція Use Case). Функціональна модель визначає основні сценарії взаємодії користувача з фреймворком. Її центральна ідея полягає у виділенні ключових дій, що охоплюють повний цикл роботи із задачею покриття.

На концептуальному рівні функціональна структура включає такі можливості:

- Завантаження геометрії області покриття та заборонених зон. Користувач може імпортувати просторові дані у різних форматах, що дає змогу застосувати методи покриття в реальних просторових середовищах.
- Конфігурація параметрів задачі. Це включає вибір типу об'єктів покриття, кількість елементів, параметри трансформації та структуру обмежень.
- Вибір та налаштування методу оцінювання покриття. Фреймворк дозволяє використовувати як швидкі апроксимаційні методи, так і точні геометричні алгоритми, що важливо для різних етапів оптимізації.
- Запуск оптимізаційних алгоритмів. Користувач може обирати між глобальними ройовими методами, меметичними модифікаціями або комбінованими схемами з нейросурогатами.
- Моніторинг перебігу оптимізації. Система підтримує візуальне відображення поточного покриття, динаміки значення цільової функції та ключових характеристик пошуку.
- Експорт результатів. Оптимальна конфігурація може бути збережена для використання у GIS, у подальших розрахунках або для документування.

Таким чином, функціональна модель окреслює повний життєвий цикл задачі, забезпечуючи зрозумілий інтерфейс та структуровану взаємодію з основними можливостями фреймворку.

Структурна модель системи (концепція Class Diagram). Структурна модель визначає внутрішню організацію компонентів фреймворку, їхні взаємозв'язки та відповідальність. В основі архітектури - модульний підхід, який забезпечує гнучкість, розширюваність і можливість заміни компонентів без зміни загальної логіки системи.

Структуру фреймворку можна описати через такі підсистеми:

- Геометрична підсистема. Ця підсистема відповідає за роботу з просторовими об'єктами, тобто опис області покриття, представлення заборонених зон, параметризовані об'єкти покриття довільної форми, операції над геометричними множинами (перетин, об'єднання, повороти, трансформації). Вона забезпечує незалежність від конкретних обчислювальних бібліотек і дозволяє легко додавати нові типи геометричних елементів.
- Підсистема оцінювання покриття. Цей модуль реалізує різні стратегії обчислення площі покриття - від швидких сіткових апроксимацій до точних геометричних алгоритмів. Важливим є концепт єдиної абстракції оцінювача, що дає змогу динамічно

змінювати метод обчислення залежно від етапу оптимізації, вимог до точності та доступних ресурсів.

- Оптимізаційне ядро. Центральна частина системи, що включає глобальні ройові алгоритми (PSO, FSS, FA, ABC), меметичні модифікації з локальними методами, адаптивний модуль штрафних функцій, нейросурогат для прискореної оцінки покриття. Структурна модель забезпечує можливість швидкої заміни або комбінування алгоритмів, а також реалізацію політик перемикавання між грубими та точними методами оцінювання.

- Сервісні та інтеграційні компоненти. До них належать модулі імпорту/експорту просторових даних, засоби візуалізації покриття та динаміки оптимізації, зберігання сценаріїв. Ці компоненти забезпечують практичну придатність системи до реальних задач.

Таким чином, UML-орієнтоване моделювання дозволяє формально визначити архітектуру інтегрованої системи для задач неперервного покриття, не потребуючи включення самих UML-діаграм в текст статті.

Функціональна структура окреслює сценарії роботи фреймворку, а структурна модель взаємодію його внутрішніх модулів. Такий підхід забезпечує логічну організацію компонентів, можливість їх незалежного вдосконалення, гнучкість у виборі методів оцінювання та оптимізації, масштабованість для реальних просторових задач.

Обговорення та висновки. Запропонований інтегрований AI-базований фреймворк для задач неперервного покриття з геометричними обмеженнями дозволяє повному осмислити процес оптимізації просторових систем. На відміну від класичних підходів, що покладаються на єдиний алгоритм або одну методологічну парадигму, представлений фреймворк об'єднує три ключові компоненти: метаевристичну оптимізацію, нейромережеве прискорення та UML-орієнтоване архітектурне моделювання. Така інтеграція дає змогу працювати зі складними геометричними областями, різними типами об'єктів покриття та обмеженнями довільної форми, забезпечуючи масштабованість та адаптивність системи.

Розглянуті ройові та меметичні алгоритми демонструють значні переваги у задачах покриття, оскільки їх поведінка природним чином відповідає динамічній перебудові геометричної конфігурації. Геометрична інтерпретація операторів PSO, FSS, FA та ABC дозволяє краще розуміти характер пошуку, їх здатність до глобальної та локальної реалізації, а також визначати оптимальні стратегії налаштування параметрів. Меметичні розширення підсилюють точність рішень завдяки локальним методам оптимізації та забезпечують перевагу в задачах, де необхідно поєднати глобальний пошук з високоточним доведенням конфігурації.

Другим важливим елементом фреймворку є використання нейромережевих методів, що дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати. Сурогатне моделювання площі покриття дає можливість замінити значну частину точних, але дорогих геометричних операцій швидкими прогнозами нейромережі. Натомість адаптивні штрафні функції на основі нейронних моделей роблять процес оптимізації більш стійким до

складних топологічних обмежень та зменшують залежність від ручного налаштування параметрів. Разом ці два підходи дозволяють масштабувати оптимізацію на задачі з десятками або сотнями параметрів і складною геометричною структурою.

UML-орієнтована архітектура доповнює математичну складову, забезпечуючи формальний опис структури та поведінки системи. Текстовий аналіз моделі, що ґрунтується на UML-діаграмах, дає чітке уявлення про модульність фреймворку, його здатність інтегрувати нові алгоритми, змінювати методи оцінювання покриття, працювати з різними форматами просторових даних та забезпечувати повторне використання компонентів. Такий підхід робить систему придатною для практичної реалізації в GIS-платформах, транспортних системах, робототехніці, екологічному моніторингу та інших галузях, де покриття відіграє ключову роль.

Узагальнюючи, запропонований фреймворк є комплексним рішенням, яке поєднує теоретичну узагальненість, алгоритмічну гнучкість та інженерну практичність. Він закладає основу для створення інтегрованих інтелектуальних систем, здатних розв'язувати широке коло задач покриття у складних і динамічних просторових середовищах.

Таким чином, можна зробити такі висновки по результатам, отриманим у цій роботі.

1. Розроблено інтегрований AI-базований фреймворк для задач неперервного покриття з геометричними обмеженнями, який об'єднує метаевристичні, нейромережеві та моделювальні підходи.
2. Запропоновано геометрично інтерпретовану методологію налаштування роєвих та меметичних алгоритмів, що підвищує ефективність глобального та локального пошуку.
3. Показано роль нейросурогатів і нейронно-адаптивних штрафних функцій у прискоренні оптимізації та обробці складних просторових обмежень.
4. Використання UML-орієнтованої архітектури забезпечує модульність, масштабованість та практичну реалізованість фреймворку.
5. Запропонований підхід може бути розширений у напрямі динамічних задач покриття, мультиагентних систем, багатокритеріальної оптимізації та інтеграції з реальними потоками даних.

Подяка. Дослідження виконано в рамках проєкту № 3-41-26 «Оптимізація адаптивного геометричного покриття на основі нечіткої логіки, генеративних змагальних мереж і варіаційних автокодерів» за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Church R.L., ReVelle C.S. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 1974, 32(1), 101–118. DOI: 10.1007/BF01942293.
2. Wei R., Murray A.T. Continuous space maximal coverage: Insights, advances and challenges. *Computers & Operations Research*, 2015, 62, 325–336. DOI: 10.1016/j.cor.2014.04.010.

3. Krieg H., Seidel T., Schwientek J., Küfer K.-H. Solving continuous set covering problems by means of semi-infinite optimization. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2022, 96(1), 39–82. DOI: 10.1007/s00186-022-00776-y.
4. Yakovlev S.V. The concept of modeling packing and covering problems using modern computational geometry software. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2023, 59(1), 108–119. DOI: 10.1007/s10559-023-00547-5.
5. Yakovlev S., Kartashov O., Podzheha D. Mathematical models and nonlinear optimization in continuous maximum coverage location problem. *Computation*, 2022, 10(7), 119. DOI: 10.3390/computation10070119.
6. Yakovlev S. et al. Continuous maximum coverage location problem with arbitrary shape of service areas and regional demand. *Symmetry*, 2025, 17(5), 676. DOI: 10.3390/sym17050676.
7. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks (ICNN'95)*, Perth, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
8. Bastos-Filho C.J.A., et al. A novel search algorithm based on fish school behavior. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B, Cybern.*, 2009, 39(2), 237–252. DOI: 10.1109/TSMCC.2009.2030235.
9. Yang X.-S. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. In: O. Watanabe, T. Horita (eds.) *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5792, pp. 169–178. Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-04944-6_14
10. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 2007, 39(3), 459–471. DOI: 10.1007/s10898-007-9149-x.
11. Neri F., Cotta C. Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2012, 2, 1–14. DOI: 10.1016/j.swevo.2011.11.003.
12. Molina D., Lozano M., Herrera F. Memetic algorithms for continuous optimisation based on local search chains. *Evolutionary Computation*, 2015, 23(1), 1–28. DOI: 10.1162/EVCO_a_00124.
13. Forrester A., Sóbester A., Keane A. *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. Chichester: Wiley, 2008. DOI: 10.1002/9780470770801.
14. Jin Y., Wang H., Chugh T., Guo D., Miettinen K. Data-driven evolutionary optimization: An overview and case studies. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2019, 23(3), 442–458. DOI: 10.1109/TEVC.2018.2869001.
15. Zaheer M., Kottur S., Ravanbakhsh S., Póczos B., Salakhutdinov R., Smola A. Deep Sets. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30, 3391–3401. Available: <https://arxiv.org/abs/1703.06114>.
16. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 2019, 378, 686–707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.

17. Object Management Group. *Unified Modeling Language (UML), Version 2.5.1*, formal/17-12-05, Dec. 2017. Available: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1>
18. Gillies S. Shapely: Computational Geometry Library, ver. 2.0.0. Zenodo, 2021. DOI: 10.5281/zenodo.7428463.
19. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4), 393–422. DOI: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4.
20. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 31(1–4), 113–126. DOI: 10.1023/A:1016639210559.
21. Yakovlev S., Kiseleva O., Chumachenko D., Podzeha D. Maximum service coverage in business site selection using computer geometry software. *Electronics*, 2023, 12(10), 2329. DOI: 10.3390/electronics12102329.

Received 16.01.2026.

Accepted 21.01.2026.

***Integrated ai-based framework for the continuous coverage problems
with geometric constraints***

Abstract. The paper presents an integrated methodology for an AI-based hybrid framework designed to solve the continuous coverage problem under geometric constraints. The relevance of this work is driven by the wide range of applications of coverage models in telecommunications, logistics, robotics, territorial monitoring, and spatial planning, where classical discrete formulations become insufficient due to the complexity of real geographic regions and the necessity to optimize continuous parameters. The problem statement focuses on developing a methodological approach capable of combining complex geometric operations, global optimization procedures, and intelligent predictive models to enhance computational efficiency. The aim of the study is to construct a unified hybrid framework that integrates metaheuristic and memetic optimization methods with neural surrogate models and a UML-oriented information system architecture. The proposed methods include swarm and evolutionary algorithms, adaptive penalty mechanisms, neural approximation models, and combined techniques for coverage area evaluation. The results are presented in the form of a conceptual comparison of the efficiency of different framework components and their synergistic influence on the accuracy and performance of the optimization process. The conclusions emphasize the applicability of the integrated AI-based framework to large-scale coverage problems and its potential for further development towards dynamic and multi-criteria problem settings.

Keywords: continuous coverage, spatial modeling, swarm optimization, memetic algorithms, artificial intelligence, UML architecture.

Гаврилюк Єгор – аспірант кафедри математичного моделювання та аналізу даних, ННІ комп’ютерних наук та штучного інтелекту, Харківській національний університет імені В.Н. Каразіна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4392-2000>

Струков Володимир – к.т.н., доцент, зав. кафедри математичного моделювання та аналізу даних моделювання та аналізу даних, ННІ комп’ютерних наук та штучного інтелекту, Харківській національний університет ім. В.Н. Каразіна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4722-3159>

Узлов Дмитро – к.т. н., доцент, директор ННІ комп’ютерних наук та штучного інтелекту, Харківській національний університет імені В.Н. Каразіна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3308-424X>

Yehor Havryliuk – phd student at the department of mathematical modeling and data analysis, educational and scientific institute of computer sciences and artificial intelligence, V.N. Karazin Kharkiv National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4392-2000>

Volodymyr Strukov – candidate of technical sciences, ass.professor, head of the department of mathematical modeling and data analysis, educational and scientific institute of computer sciences and artificial intelligence, V.N. Karazin Kharkiv National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4722-3159>

Dmytro Uzlov – candidate of technical sciences, ass.professor, head of the educational and scientific institute of computer sciences and artificial intelligence, V. N. Karazin Kharkiv National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3308-424X>

ЕФЕКТ ПОВЕРХНЕВОЇ ПРУЖНОСТІ ПРИ АНАЛІЗІ НАНОТРІЩИНИ В АНТИПЛОСКОМУ ПОЛІ НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація. Досліджено вплив поверхневої пружності на пружно-деформівний стан тріщини типу III, що має місце при антиплоских зсувних деформаціях лінійно пружного тіла. Механічні ефекти, що виникають біля поверхонь, зокрема берегів тріщин, враховано за допомогою континуальної моделі поверхні-границі Гуртина та Мердока. Сформульовано умови рівноваги на поверхні тріщини, а також співвідношення між поверхневими та основними напруженнями. З використанням цих співвідношень випи-суються уточнені граничні умови на верхньому та нижньому берегах тріщини, які в подальшому аналізуються методами теорії функцій комплексної змінної. В результаті цього аналізу формулюється сингулярне інтегро-диференціальне рівняння першого порядку з ядром типу Коші. Для його розв'язання використовується представлення невідомих функцій по многочленах Чебишева першого роду та метод колокації по вузлах цих многочленів. Розв'язок отриманої при цьому системи лінійних алгебраїчних рівнянь дозволяє отримати коефіцієнти вказаних розкладень. Знайдена формула для обчислення напруження на продовженні тріщини, яка виражається інтегралом з ядром типу Коші. Проводиться всебічний аналіз особливостей числової реалізації розробленого алгоритму, який включає варіації кількості складових у розкладеннях невідомих функцій по многочленах Чебишева і кількості вузлів у квадратурних формулах Гауса для обчислення вказаного інтегралу. Графічно проілюстрована поведінка різниці напружень між верхнім та нижнім берегами тріщини, а також розподіл іншої компоненти напружень на її продовженні в околі правої вершини. Проілюстрована також залежність цих величин від значень рівномірного зсувного напруження, заданого на берегах тріщини. Показано, що врахування поверхневої пружності стає особливо відчутним, коли довжина тріщини є меншою мікрметра. Подальше зменшення цієї довжини приводить до суттєвої зміни характеру розподілу напружень в околі вершини тріщини. Зокрема зникає коренева особливість напружень у вершинах тріщини, яка характерна при використанні класичної моделі і напруження в цих вершинах стають скінченними.

Ключові слова: напруження, поверхнева пружність, тріщина, антиплоска деформація, інтегро-диференціальне рівняння, аналітичний метод.

Постановка проблеми. Розглянемо антиплоску деформацію лінійно пружного, однорідного ізотропного твердого тіла, що займає циліндричну область в тривимірному просторі з твірними, паралельними осі z прямокутної декартової системи координат.

Припустимо, що циліндр нескінченний у довжину та піддається рівномірному віддаленому зсувному напруженню. Припустимо, що циліндр містить одну внутрішню тріщину, що проходить по всій довжині циліндра. У типовому поперечному перерізі тріщина займає область $[-a, a]$ осі x (рис. 1). Для заданої тріщини типу III враховуються поверхневі ефекти в рамках моделі поверхневої пружності Гуртина-Мердока.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Континуальна модель, що враховує ефекти поверхневої механіки з використанням моделі поверхневої пружності була запропонована в роботах [1, 2] і суттєво розвинута в [3]. У цій моделі поверхня розглядається як тонка пружна мембрана, ідеально з'єднана з основним твердим тілом. Додаткове поверхнєве напруження, зумовлене поверхневим шаром, модифікує граничні умови на поверхні основного твердого тіла, які не охоплюються існуючими класичними теоріями.

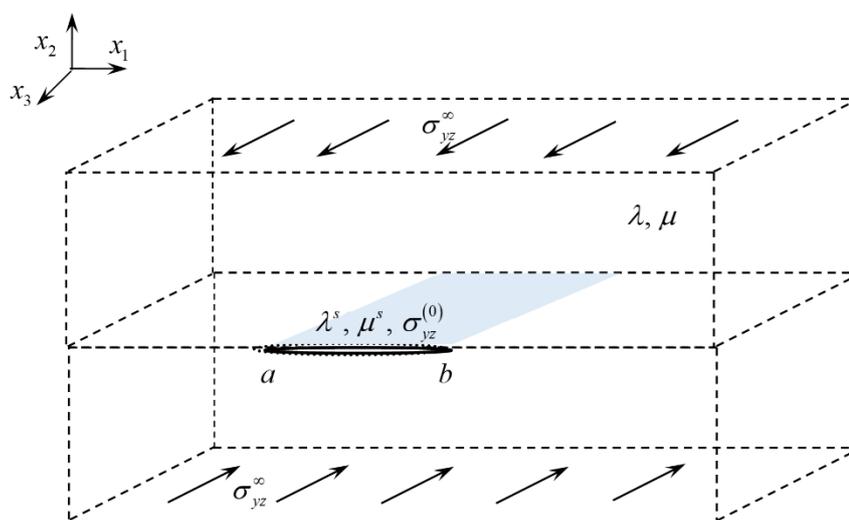


Рисунок 1 - Нанотріщина в пружному тілі під дією антиплоского навантаження

У макроскопічних моделях напруження у вершині тріщини виявляються нескінченними, що відображає той факт, що фронт тріщини зазвичай вважається ідеально гострим. Фактично, нескінченно гостра тріщина в континуумі є математичною абстракцією, оскільки насправді більшість вершин тріщин, по суті, є тупими з радіусом закруглення порядку, сумісного з наномасштабом. Це вказує на те, що більш точний аналіз області поблизу вершини тріщини може бути досягнутий у наномасштабі. Такі підходи успішно використані у низці досліджень, наприклад, у плоскому випадку в роботах [4-6].

Що стосується поверхневих ефектів для тріщини типу III, то їх урахування проводилось в роботах [7-9]. При цьому автори роботи [7] досліджували внесок поверхневих ефектів у напруження поблизу вершини тріщини III типу обмежуючись лише околom вершини тріщини. Більш повний розв'язок аналогічної задачі був наведений в [8], але в ньому не було враховано можливе навантаження берегів тріщини.

Вплив поверхневого натягу на антиплоску деформацію біматеріалу з тонким міжфазним мікрвключенням було враховано в роботі [10]. Забезпечена також мож-

лівість врахування неідеального, зокрема натяжного контакту між включенням і матрицею.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження тріщини типу III у пружному тілі з урахуванням поверхневих ефектів у рамках моделі поверхневої пружності Гуртина-Мердока. Аналіз провести за допомогою методу комплексних потенціалів, та апарату сингулярних інтегро-диференціальних рівнянь. Врахувати зсувне навантаження на нескінченності та на берегах тріщини. Показати, що врахування поверхневої пружності усуває сингулярність напруження у вершині тріщини та призводить до скінченних напружень у її околі.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Визначальні рівняння антиплоскої задачі для тріщини з поверхневим напруженням. За відсутності об'ємних сил рівняння рівноваги та визначальні рівняння, що описують деформацію лінійно пружних, однорідних та ізотропних твердих тіл, мають вигляд:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad \boldsymbol{\sigma} = \lambda \mathbf{I}_3 \operatorname{Tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

де λ та μ – константи Ламе матеріалу; $\boldsymbol{\sigma}$ та $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензори напруження та деформації відповідно; а \mathbf{I}_3 – одиничний тензор в тривимірному просторі. Ці рівняння описують основний матеріал тіла.

Поверхневе рівняння. У моделі поверхневої пружності Гуртина-Мердока поверхня тріщини розглядається як тонка пружна мембрана (з пружними константами, відмінними від основного матеріалу), ідеально з'єднана з навколишнім матеріалом. Застосуємо цю модель до поставленої задачі.

Рівняння (1) залишаються справедливими в основному матеріалі, а рівновага на поверхні тріщини описується рівняннями [1, 2]

$$[\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}] + \operatorname{div}_s \boldsymbol{\sigma}^s = 0, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^s = \sigma_0 \mathbf{I}_2 + 2(\mu^s - \sigma_0) \boldsymbol{\varepsilon}^s + (\lambda^s + \sigma_0) \operatorname{Tr}(\boldsymbol{\varepsilon}^s) \mathbf{I}_2, \quad (3)$$

тут індекс s позначає відповідну величину, що є результатом впливу поверхневої пружності, \mathbf{n} представляє собою одиничну нормаль до поверхні тріщини, \mathbf{I}_2 є одиничним тензором в двовимірному просторі, $[*] = (*)^+ - (*)^-$ позначають стрибок відповідної величини через поверхневий шар (тут "+" і "-" відносяться, відповідно, до верхньої та нижньої поверхонь шару, як показано на рис. 1), а через σ_0 позначено поверхневий натяг. Зазначимо, що до рівняння (3) включено лише компоненти поверхневої деформації (тобто деформації, нормальні до поверхні, виключені).

Поверхнева дивергенція $\operatorname{div}_s \mathbf{u}$ визначається (в загальному випадку) як

$$\operatorname{div}_s \mathbf{u} = \operatorname{div}_s \mathbf{u}_s - 2k u_n,$$

де k – середня кривизна, а вектор переміщення \mathbf{u} допускає таке однозначне розкладення:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_s + u_n \mathbf{n},$$

де u_s є відповідним тангенціальним зміщенням, а u_n – нормальна компонента вектора \mathbf{u} .

Комплексі представлення для антиплоскої деформації. У випадку антиплоского зсуву в ізотропному пружному середовищі (задача про тріщину типу III) вектор переміщення \mathbf{u} з компонентами u, v, w задовольняє умовам

$$u(x, y) = v(x, y) = 0, \quad w = w(x, y), \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0.$$

Із співвідношень Коші витікає, що компоненти деформації задаються так

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{zz} = 0. \quad (4)$$

З рівняння (5) компоненти тензора напружень можна записати як

$$\sigma_{xz} = 2\mu\varepsilon_{xz} = \mu \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \sigma_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz} = \mu \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (5)$$

а інші компоненти напруження дорівнюють нулю.

Оскільки $w(x, y)$ є гармонійною функцією, позначаємо через $\psi(x, y)$ спряжену до неї гармонійну функцію. Вводячи комплексну змінну $z = x + iy$, можемо записати.

$$w = \operatorname{Re}[F(z)], \quad F(z) = w(x, y) + i\psi(x, y). \quad (6)$$

де $F(z)$ є аналітичною функцією z на площині $S = S^+ \cup S^-$ поза межами тріщини (рис. 1). Тоді з рівняння (6) маємо

$$\frac{dF}{dz}(z) = F'(z) = \frac{\partial w}{\partial x} - i \frac{\partial w}{\partial y} = \frac{1}{\mu} (\sigma_{xz} - i\sigma_{yz}),$$

$$\sigma_{yz} = \frac{\mu i}{2} [F'(z) - \overline{F'(z)}], \quad \sigma_{xz} = \frac{\mu}{2} [\overline{F'(z)} + F'(z)]. \quad (7)$$

Рівняння рівноваги на поверхні тріщини. Позначимо через $\{e_i\}_{i=1}^3$ вектори стандартного базису тривимірного простору. Тоді на основі рівняння (2) умови рівноваги на поверхні тріщини запишуться у вигляді [1, 2].

$$\sigma_{\alpha\beta,\beta}^s e_\alpha + [\sigma_{ij} n_j e_i] = 0, \quad k_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta}^s = [\sigma_{ij} n_i n_j], \quad (8)$$

де $\alpha, \beta = 1, 3$.

Враховуючи, що в нашому випадку нормаль до поверхні тріщини спрямована вздовж e_2 або напрямку y , рівняння (8) набувають вигляду

$$\sigma_{xx,x}^s + \sigma_{xz,z}^s + [\sigma_{xy}] = 0, \quad \sigma_{zx,x}^s + \sigma_{zz,z}^s + [\sigma_{yz}] = 0, \quad (9)$$

$$[\sigma_{yy}] = -\sigma_0 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (10)$$

$$\sigma_{\alpha\beta}^s = \sigma_0 \delta_{\alpha\beta} + 2(\mu^s - \sigma_0) \varepsilon_{\alpha\beta} + (\lambda^s + \sigma_0) \varepsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}, \quad (11)$$

де $\alpha, \beta, \gamma = 1, 3$.

З останніх рівнянь та (4) і (5) витікають співвідношення між поверхневими (на берегах тріщини) та основними напруженнями у вигляді

$$\sigma_{xz}^s = 2(\mu^s - \sigma_0) \varepsilon_{xz} = \frac{\mu^s - \sigma_0}{\mu} \sigma_{xz}, \quad \sigma_{yz}^s = 2(\mu^s - \sigma_0) \varepsilon_{yz} = \frac{\mu^s - \sigma_0}{\mu} \sigma_{yz} \quad (12)$$

У цих рівняннях враховано, що для взаємозв'язаного інтерфейсу деформації на поверхні дорівнюють деформаціям у прилеглому основному матеріалі, тобто $\varepsilon_{xz}^s = \varepsilon_{xz}$ та $\varepsilon_{yz}^s = \varepsilon_{yz}$.

Враховуючи далі, що розглядається антиплоский зсув, рівняння (9), (10) можуть бути зведені до вигляду

$$\sigma_{xz,x}^s + [\sigma_{yz}^s] = 0. \quad (13)$$

Тріщина типу III з поверхневим натягом. Позначимо границі нижньої $y < 0$ та верхньої $y > 0$ півплощин знаками "-" та "+", відповідно. Тоді, з рівняння (13), граничні умови на поверхні тріщини можна записати як

$$\frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial x} + (\sigma_{yz}^s)^+ - (\sigma_{yz}^s)^- = 0, \text{ на верхньому березі,} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial x} + (\sigma_{yz}^s)^+ - (\sigma_{yz}^s)^- = 0, \text{ на нижньому березі,} \quad (15)$$

причому в (14) $(\sigma_{yz}^s)^- = \sigma_{yz}^{(0)}$, а в (15) $(\sigma_{yz}^s)^+ = \sigma_{yz}^{(0)}$, де $\sigma_{yz}^{(0)}$ – рівномірне зсувне напруження, що прикладене до берегів тріщини.

З рівнянь (4), (7), (12), (14) і (15), для тріщини $-a < x < a$, $y = 0$, береги якої зазнають рівномірного зсувного напруження $\sigma_{yz}^{(0)}$, умови на берегах тріщини можна записати наступним чином.

На верхньому березі:

$$(\sigma_{yz}^s)^+ = \sigma_{yz}^{(0)} - \frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial x} = \sigma_{yz}^{(0)} - (\mu^s - \sigma_0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \sigma_{yz}^{(0)} - \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} [F''(z) + \overline{F''(z)}]^+. \quad (16)$$

На нижньому березі

$$(\sigma_{yz}^s)^- = \sigma_{yz}^{(0)} + \frac{\partial \sigma_{xz}^s}{\partial x} = \sigma_{yz}^{(0)} + (\mu^s - \sigma_0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \sigma_{yz}^{(0)} + \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} [F''(z) + \overline{F''(z)}]^-. \quad (17)$$

Будемо також вважати, що задане рівномірне зсувне напруження $\sigma_{yz} = \sigma_{yz}^\infty$ на нескінченності.

Враховуючи (16) та (17), з рівнянь (7) можна сформулювати умови на берегах тріщини.

На верхньому березі:

$$\frac{\mu i}{2} [F'(z) - \overline{F'(z)}]^+ = \sigma_{yz}^{(0)} - \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} [F''(z) + \overline{F''(z)}]^+. \quad (18)$$

На нижньому:

$$\frac{\mu i}{2} [F'(z) - \overline{F'(z)}]^- = \sigma_{yz}^{(0)} + \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} [F''(z) + \overline{F''(z)}]^-. \quad (19)$$

При антиплоскій деформації (тріщина типу III) очевидно, що $w^+ = -w^-$. Тоді на основі (6) рівняння (18) та (19) можна записати у вигляді:

на верхньому березі:

$$\frac{\mu i}{2} \left[F'(z) - \overline{F'(z)} \right]^+ = \sigma_{yz}^{(0)} + \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} \left[F''(z) + \overline{F''(z)} \right]^-, \quad (20)$$

на нижньому:

$$\frac{\mu i}{2} \left[F'(z) - \overline{F'(z)} \right]^- = \sigma_{yz}^{(0)} + \frac{\mu^s - \sigma_0}{2} \left[F''(z) + \overline{F''(z)} \right]^-. \quad (21)$$

Оскільки ми припустили рівномірний розподіл напружень на нескінченності і на берегах тріщини, то на основі першого рівняння (7) маємо $F'(z) + \overline{F'(z)} = 0$, звідки отримуємо

$$F'(z) = -\overline{F'(z)}. \quad (22)$$

Нагадаємо [11], що

$$\overline{F(z)} = F(\overline{z}) \text{ і } \overline{F^+(x)} = \overline{F^-(x)}, \quad \overline{F^-(x)} = \overline{F^+(x)}. \quad (23)$$

Склавши рівняння (20) та (21) маємо

$$\frac{\mu i}{2} \left(\left[F'(z) - \overline{F'(z)} \right]^+ + \left[F'(z) - \overline{F'(z)} \right]^- \right) = 2\sigma_{yz}^{(0)} + (\mu^s - \sigma_0) \left(F''(z)^- + \overline{F''(z)}^- \right). \quad (24)$$

Використовуючи (23), отримуємо

$$\frac{\mu i}{2} \left(F'(z)^+ + F'(z)^- - \overline{F'(z)}^+ - \overline{F'(z)}^- \right) = 2\sigma_{yz}^{(0)} + (\mu^s - \sigma_0) \left(F''(z)^- - F''(z)^+ \right). \quad (25)$$

Але згідно з (22) та (23) маємо

$$-\overline{F'(z)}^+ - \overline{F'(z)}^- = -\overline{F'(z)}^- - \overline{F'(z)}^+ = F'(z)^- + F'(z)^+.$$

Тоді рівняння (25) приймає вигляд:

$$\mu i \left(F'(z)^+ + F'(z)^- \right) = 2\sigma_{yz}^{(0)} + (\mu^s - \sigma_0) \left(F''(z)^- - F''(z)^+ \right). \quad (26)$$

Далі, запишемо невідому функцію $F(z)$ як інтеграл типу Коші [11]:

$$F'(z) = \frac{1}{2i\pi} \int_{-a}^a \frac{f(t) dt}{t-z} + \frac{1}{\mu i} \sigma_{yz}^\infty. \quad (27)$$

Тоді, враховуючи вимогу обмеженості напружень на кінцях тріщини, отримаємо:

$$F''(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-a}^a \frac{f(t) dt}{(t-z)^2} = - \left[\frac{f(t)}{t-z} \right]_{-a}^a + \frac{1}{2\pi i} \int_{-a}^a \frac{f'(t) dt}{t-z} = \frac{1}{2\pi i} \int_{-a}^a \frac{f'(t) dt}{t-z}, \quad (28)$$

де $f(t_0) = F'(z)^+ - F'(z)^-$, $-a \leq t_0 \leq a$, $f(a) = f(-a) = 0$ (скінченне напруження у вершинах тріщини).

З рівнянь (26), (27) та (28) отримуємо таке сингулярне інтегро-диференціальне рівняння першого порядку типу Коші для невідомої функції $f(t)$ при $t \in [-a, a]$:

$$\frac{\mu}{\pi} \int_{-a}^a \frac{f(t) dt}{t-t_0} + (\mu^s - \sigma_0) f'(t_0) = -2 \left(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)} \right), \quad -a \leq t_0 \leq a, \quad f(a) = f(-a) = 0. \quad (29)$$

Розв'язання сингулярного інтегро-диференціального рівняння. Якщо покласти $\xi = t/a$, $\xi_0 = t_0/a$ у рівнянні (29), то отримаємо

$$\frac{\mu}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{f(a\xi) d\xi}{\xi - \xi_0} + (\mu^s - \sigma_0) \frac{df(a\xi_0)}{d(a\xi_0)} = -2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)}), \quad -1 \leq \xi_0 \leq 1. \quad (30)$$

Додатково позначаючи $g(\xi) = f(a\xi)$, з рівняння (30) отримуємо:

$$\frac{\mu}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{g(\xi) dt}{\xi - \xi_0} + \frac{(\mu^s - \sigma_0)}{a} \frac{dg(\xi_0)}{d\xi_0} = -2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)}), \quad -1 \leq \xi_0 \leq 1, \quad g(1) = g(-1) = 0. \quad (31)$$

Розв'язок рівняння (31) на основі [14] має вигляд

$$g(\xi_0) = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - \xi_0^2}} \int_{-1}^1 g(\xi) d\xi + \frac{1}{\mu \pi \sqrt{1 - \xi_0^2}} \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{t - \xi_0} \left(2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)}) + \frac{(\mu^s - \sigma_0)}{a} \frac{dg(\xi)}{d\xi} \right) d\xi, \quad \xi_0 \in (-1, 1), \quad g(1) = g(-1) = 0. \quad (32)$$

Помноживши обидві частини на $\sqrt{1 - \xi_0^2}$ маємо

$$g(\xi_0) \sqrt{1 - \xi_0^2} - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 g(\xi) d\xi - \left(\frac{\mu^s - \sigma_0}{a \mu \pi} \right) \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi - \xi_0} \frac{dg(\xi)}{d\xi} d\xi = \frac{2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)})}{\mu \pi} \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi - \xi_0} d\xi. \quad (33)$$

Будемо розшукувати функцію $g(\xi_0)$ у формі

$$g(\xi_0) = \sum_{m=0}^N a_m T_m(\xi_0), \quad \xi_0 \in [-1, 1], \quad (34)$$

де $T_m(\xi_0)$ представляє m -й поліном Чебишева першого роду.

Застосовуючи крайові умови $g(1) = g(-1) = 0$ і використовуючи рівняння (31), знаходимо, що

$$g(-1) = \sum_{m=0}^N a_m T_m(-1) = \sum_{m=0}^N a_m (-1)^m = 0, \quad g(1) = \sum_{m=0}^N a_m T_m(1) = \sum_{m=0}^N a_m = 0, \quad T_m(-1) = (-1)^m, \quad T_m(1) = 1. \quad (35)$$

Крім того, для поліному Чебишева другого роду $U_m(x)$, маємо

$$\frac{dT_m(x)}{dx} = m U_{m-1}(x). \quad (36)$$

Отже, з рівнянь (34) і (36) знаходимо, що

$$\frac{dg(\xi_0)}{d\xi_0} = \frac{d}{d\xi_0} \left(\sum_{m=0}^N a_m T_m(\xi_0) \right) = \sum_{m=0}^N m a_m U_{m-1}(\xi_0), \quad \xi_0 \in [-1, 1]. \quad (37)$$

Підставляючи рівняння (34) та (37) до рівняння (33), маємо

$$\sum_{m=0}^N a_m \left[T_m(\xi_0) \sqrt{1-\xi_0^2} - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 T_m(\xi) d\xi - m \left(\frac{\mu^s - \sigma_0}{a\mu\pi} \right) \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi - \xi_0} U_{m-1}(\xi) d\xi \right] = \frac{2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)})}{\mu\pi} \int_{-1}^1 \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi - \xi_0} d\xi, \quad \xi_0 \in [-1, 1]. \quad (38)$$

Використовуємо властивості ортогональності поліному Чебишева та наступні інтегральні співвідношення:

$$\int_{-1}^1 \frac{U_n(t) \sqrt{1-t^2}}{t-x} dt = -\pi T_{n+1}(x), \quad n=0, 1, 2, \dots, \quad \int_{-1}^1 T_m(x) dx = \frac{1+(-1)^m}{1-m^2}, \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (39)$$

Отже, на основі (39) рівняння (38) зводиться до вигляду

$$\sum_{m=0}^N a_m \left[T_m(\xi_0) \sqrt{1-\xi_0^2} - \frac{1}{\pi} \left(\frac{1+(-1)^m}{1-m^2} \right) + \left(\frac{\mu^s - \sigma_0}{a\mu} \right) m T_m(\xi_0) \right] = -\frac{2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)})}{\mu} T_1(\xi_0).$$

Виберемо множину точок колокації $\xi_0 = \xi_{0i} = -\cos\left(\frac{i\pi}{N}\right)$, $i=1, 2, \dots, N-1$, і в результаті отримаємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів a_m :

$$\sum_{m=0}^N a_m \left[T_m(\xi_{0i}) \sqrt{1-\xi_{0i}^2} - \frac{1}{\pi} \left(\frac{1+(-1)^m}{1-m^2} \right) + \left(\frac{\mu^s - \sigma_0}{a\mu} \right) m T_m(\xi_{0i}) \right] = -\frac{2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)})}{\mu} T_1(\xi_{0i}), \quad i=1, 2, \dots, N-1. \quad (40)$$

Враховуючи властивість поліномів Чебишева першого роду $T_m(\cos\theta) = \cos m\theta$, система (40) зводиться до наступного вигляду:

$$\sum_{m=0}^N a_m \left[-\cos\left(\frac{mi\pi}{N}\right) \sqrt{1 - \left(\cos\left(\frac{i\pi}{N}\right)\right)^2} - \frac{1+(-1)^m}{\pi(1-m^2)} - m S_e \cos\left(\frac{mi\pi}{N}\right) \right] = \frac{2(\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)})}{\mu} \cos\left(\frac{i\pi}{N}\right), \quad i=1, 2, \dots, N-1, \quad (41)$$

тут $S_e = \frac{\mu^s - \sigma_0}{a\mu}$ – поверхневе напруження. В подальшому будемо позначати

$\tilde{S} = \frac{\sigma_{yz}^\infty - \sigma_{yz}^{(0)}}{\mu}$ та $S = \frac{\sigma_{yz}^\infty}{\mu}$ – напруження на нескінченності.

Крім того, з рівнянь граничних умов (35) маємо:

$$\sum_{m=0}^N a_m = 0 \quad \text{для } i=0, \quad \sum_{m=0}^N a_m (-1)^m = 0 \quad \text{для } i=N. \quad (42)$$

Отже, розв'язання рівняння (29) зведено до розв'язання системи рівнянь (41) і (42) відносно невідомих коефіцієнтів a_m . В подальшому коефіцієнти a_m підставляються до формули (34) для отримання невідомої функції $g(\xi_0)$.

Результати та обговорення. У цьому розділі здійснюється чисельне розв'язання рівнянь (41) і (42) для діапазону параметрів поверхні, отриманих з роботи [12]. Проведемо спочатку порівняння з відомими класичними результатами. Для цього розглянемо антиплоску задачу для тіла з тріщиною, в якій нехтуються поверхневі ефекти. Остання задача має аналітичний розв'язок, наведений, наприклад, в [13].

$$\mu F'(z) = \sigma_{xz} - i\sigma_{yz} = \frac{-i\sigma_{yz}^{\infty} z}{\sqrt{z^2 - a^2}}.$$

$$\text{Тоді при } z \rightarrow x + i \cdot 0 \text{ на } [-a, a]: \mu F'(z)^+ = \sigma_{xz}^+ - i\sigma_{yz}^+ = \frac{-i\sigma_{yz}^{\infty} x}{i\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{-\sigma_{yz}^{\infty} x}{\sqrt{a^2 - x^2}},$$

$$\text{а при } z \rightarrow x - i \cdot 0 \text{ на } [-a, a]: \mu F'(z)^- = \sigma_{xz}^- - i\sigma_{yz}^- = \frac{-i\sigma_{yz}^{\infty} x}{-i\sqrt{a^2 - x^2}} = \frac{\sigma_{yz}^{\infty} x}{\sqrt{a^2 - x^2}}.$$

$$\text{Тобто на } [-a, a]: \sigma_{xz}^+ = \frac{-\sigma_{yz}^{\infty} x}{\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad \sigma_{yz}^+ = 0, \quad \sigma_{xz}^- = \frac{\sigma_{yz}^{\infty} x}{\sqrt{a^2 - x^2}}, \quad \sigma_{yz}^- = 0.$$

Це означає, що

$$\sigma_{xz}^+ - \sigma_{xz}^- = \mu \left(F'(z)^+ - F'(z)^- \right) = \mu f(x) = \frac{-2\sigma_{yz}^{\infty} x}{\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (43)$$

На рис. 2 наведено стрибок напруження (40) в околі правої вершини тріщини при поверхневому напруженні S_e , що змінюється в діапазоні $0,001 < S_e < 0,1$, внутрішньому тиску у тріщині $\mu^s = 161.73 \text{ (J/m}^2\text{)}$, поверхневому натягу $\sigma_0 = 1.3 \text{ (J/m}^2\text{)}$, модулі зсуву для основного матеріалу $\mu = 168 \cdot 10^9 \text{ (Па)}$ і $S = \sigma_{yz}^{\infty} / \mu = 0.1$. Крива I відповідає поверхневому напруженню $S_e = 0.1$, II – $S_e = 0.05$, III – $S_e = 0.01$, IV – $S_e = 0.005$, V – $S_e = 0.001$, а крива VI відповідає випадку відсутності поверхневих ефектів.

Слід зазначити, що параметр S_e регулюється шляхом зміни розміру тріщини. Тут і надалі розмір тріщини змінюється від 10 нм ($S_e = 0,1$) до 1 мкм ($S_e = 0,001$). З рис. 2 очевидно, що коли вплив поверхневого ефекту стає порівняно незначним, розв'язок стає близьким до класичного випадку, навіть біля вершини тріщини, де різниця напружень в класичному випадку є нескінченною.

Розглянемо тепер розподіл напружень біля вершин тріщини на її продовженні. Підставляючи формулу (27) в (7) отримуємо:

$$\sigma_{yz} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-a}^a \left(\frac{1}{t - \bar{z}} + \frac{1}{t - z} \right) f(t) dt + \sigma_{yz}^{\infty}.$$

Подальші спрощення приводять до наступної формули:

$$\sigma_{yz}(x, y) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-a}^a \left(\frac{t-x}{(t-x)^2 + y^2} \right) f(t) dt + \sigma_{yz}^{\infty}, \quad (44)$$

яка при $y=0$ і замінах $t = a\tau$ і $x = as$ приводить до виразу

$$\sigma_{yz}(as, 0) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{g(\tau)}{\tau-s} d\tau + \sigma_{yz}^{\infty}. \quad (45)$$

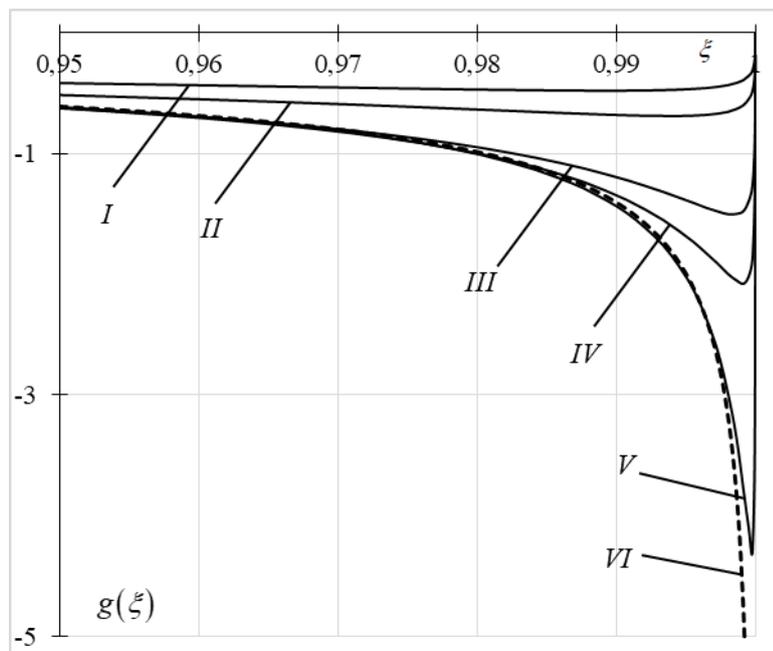


Рисунок 2 - Різниця напружень між верхнім та нижнім берегами тріщини в околі її правої вершини при $S = \sigma_{yz}^{\infty} / \mu = 0.1$ та $\sigma_{yz}^{(0)} = 0$

Результати розрахунку по формулі (45) представлені на рис. 3 і в табл. 1 для тих же механічних і геометричних параметрів, що і на рис. 2. Криві I–VI також побудовані для тих же параметрів, що і на рис. 2. В табл. 1 наведені значення напруження $\sigma_{yz}(a, 0)$ при тих же значеннях S_e , що і на рис. 2, і при різних рівнях точності розрахунку. Розрахунки проводились при врахуванні різної кількості членів (N) у розкладеннях (34) і різної кількості вузлів (n_{Gauss}) квадратурної формули Гауса, яка використовувалась для обчислення інтегралу (45). Найбільш характерні результати показані в таблиці. Зокрема, у стовпчику 2 наведені результати для порівняно невеликої точності формули Гауса, у стовпчику 3 – для невеликої кількості членів у розкладеннях (34), а у стовпчику 4 – результати, які вже практично не змінюються при збільшенні ні N , ні n_{Gauss} .

Значення напруження σ_{yz} у вершині тріщини при різних рівнях точності розрахунку

S_e	$N = 300$ $n_{Gauss} = 8$	$N = 30$ $n_{Gauss} = 30$	$N = 300$ $n_{Gauss} = 30$
0.1	0.320365	0.385986	0.508226
0.05	0.369837	0.487465	0.655736
0.01	0.428721	0.759109	1.073008
0.005	0.431797	0.868198	1.257036
0.001	0.427876	1.0327	1.542938

З наведених результатів видно, що врахування поверхневої пружності усуває сингулярність у вершинах тріщини і дозволяє отримати скінченні значення напружень у цих вершинах.

Крім того, аналіз поведінки $\sigma_{yz}(as, 0)$ для s значно більших одиниці показує, що нормована величина цього напруження на віддаленні від вершини тріщини збігаються до значення 0.1, що узгоджується з величиною прикладеного віддаленого напруження.

Залежність стрибків напружень $\sigma_{xz}^+ - \sigma_{xz}^-$ між верхнім та нижнім берегами тріщини від величин рівномірного зсувного напруження $\sigma_{yz}^{(0)}$, що визначається параметром \tilde{S} , показано на рис. 4. Графіки напружень $\sigma_{yz}(as, 0)$ побудовані для тих же механічних і геометричних параметрів, що і на рис. 4, показані на рис. 5.

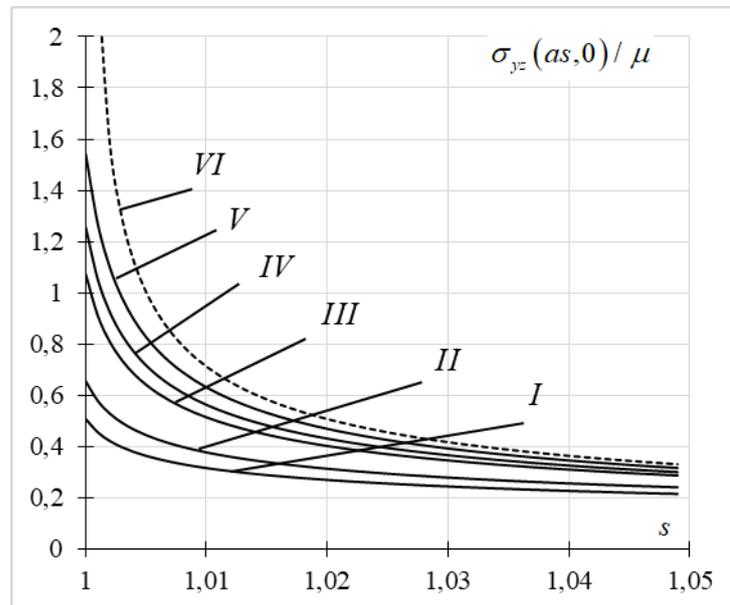


Рисунок 3 - Розподіл напружень відносно параметра поверхні S_e ,

для $S = \sigma_{yz}^\infty / \mu = 0.1$ і $\sigma_{yz}^{(0)} = 0$

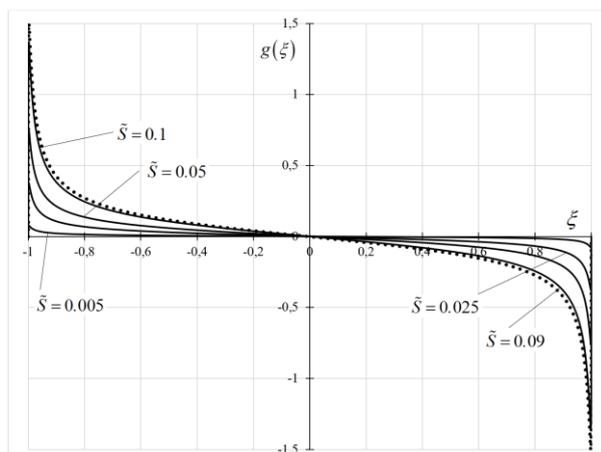


Рисунок 4 - Залежність різниці напружень $\sigma_{xz}^+ - \sigma_{xz}^-$ від величин зсувного напруження на берегах тріщини

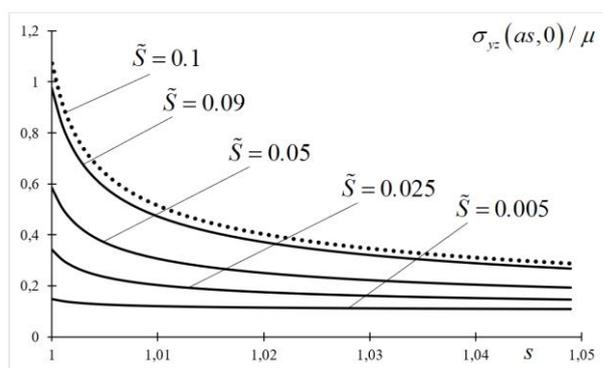


Рисунок 5 - Зміна дотичного напруження на продовженні тріщини в залежності від величин зсувного напруження на її берегах

Висновки. Досліджено вплив поверхневої пружності на антиплоску задачу для тріщини типу III у лінійно пружному твердому тілі, що знаходиться під дією віддалених зсувних напружень та навантажень на поверхні тріщини. Поверхневі ефекти враховані за допомогою континуальної моделі Гуртина і Мердока. За допомогою методів комплексної змінної проблема зведена до сингулярного інтегро-диференціального рівняння Коші першого порядку. Розв'язок цього рівняння побудований шляхом його представлення у вигляді розкладення по многочленам Чебишева і використання методу колокації. На основі цього розв'язку знайдені напруження в околі тріщини при різних її довжинах. Встановлено, що на відміну від класичного розв'язку лінійної механіки руйнування напруження у вершині тріщини залишаються скінченними. Вплив поверхневої пружності стає особливо очевидним, коли довжина тріщини є меншою мікрометра і посилюється з подальшим зменшенням цієї довжини.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Gurtin M.E., Murdoch A.I. A Continuum Theory of Elastic Material Surfaces. The Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1975. 57(4). P. 291–323.
2. Gurtin M.E., Weissmuller J., Larche F. A General Theory of Curved Deformable Interface in Solids at Equilibrium. Philosophical Magazine A. 1998. 78(5). P. 1093–1109.
3. Sharma P., Ganti S. Size-Dependent Eshelby's Tensor for Embedded Nano-Inclusions Incorporating Surface/Interface Energies. ASME Journal of Applied Mechanics. 2004. 71(5). P. 663–671.
4. Tian L., Rajapakse R.K.N.D. Analytical Solution of Size-Dependent Elastic Field of a Nano-Scale Circular Inhomogeneity. ASME Journal of Applied Mechanics. 2007. 74(3). P. 568–574.
5. Kim C.I., Schiavone P., Ru C.-Q. Analysis of plane-strain crack problems (mode I and mode II) in the presence of surface elasticity. Journal of Elasticity. 2011. 104. P. 397–420.

6. Kim C.I., Schiavone P., Ru C.-Q. Effect of surface elasticity on an interface crack in plane deformations. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 2011. 467. P. 3530–3549.
7. Wang G.-F., Feng X.-Q., Wang T.-J., Gao W. Surface Effects on the Near-Tip Stresses for Mode-I and Mode-III Cracks. ASME Journal of Applied Mechanics. 2008. 75. P. 1–5.
8. Kim C.I., Schiavone P., Ru C.-Q. The effects of surface elasticity on an elastic solid with mode III crack: Complete solution. Journal of Applied Mechanics. 2010. 77. P. 021011-1–021011-7.
9. Kim C.I., Schiavone P., Ru C.-Q. The effect of surface elasticity on a mode-III interface crack. Archives of Mechanics. 2011. 63. P. 267–286.
10. Piskozub Y.Z. Effect of surface tension on the antiplane deformation of bimaterial with a thin interface microinclusion. Mathematical Modeling and Computing. 2021. 8(1). P. 69–77.
11. Muskhelishvili N.I. Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity. Noordhoff: Groningen. 1953. 732 p.
12. Sharma P., Ganti S. Size-Dependent Eshelby's Tensor for Embedded Nano-Inclusions Incorporating Surface/Interface Energies. ASME Journal of Applied Mechanics. 2004. 71(5). P. 663–671.
13. England A.H. Complex Variable Methods in Elasticity. Wiley: London. 1971. 197 p.
14. Chakrabarti A., Hamsapriye. Numerical Solution of a Singular Integro-Differential Equation. ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1999. 79(4). pp. 233–241.

Received 19.01.2026.
Accepted 23.01.2026.

***Effect of surface elasticity in the analysis of nanocracks
under anti-plane load field***

The influence of surface elasticity on the stress-strain state of a crack type III, which occurs under antiplane shear deformations of a linearly elastic body, is investigated. Mechanical effects that arise near surfaces, particularly at the crack faces, are taken into account using the Gurtin and Murdoch continuum surface-boundary model. Equilibrium conditions on the crack surface are formulated, as well as the relationship between surface and body stresses. Using these relationships, refined boundary conditions are written on the upper and lower faces of the crack, which are further analyzed using the methods of the theory of complex variable functions. As a result of this analysis, a first-order singular integro-differential equation with a Cauchy-type kernel is formulated. For its solution, the representation of unknown functions in terms of Chebyshev polynomials of the first kind and the method of collocation on the nodes of these polynomials are used. The solution of the resulting system of linear algebraic equations allows to obtain the coefficients of the specified expansions. A formula for calculating the stress on the crack extension is found, which is expressed by an integral with a Cauchy type kernel. A comprehensive analysis of the peculiarities of the numerical implementation of the developed algorithm is carried out. It includes variations in the number of components in the expansions of unknown functions in Chebyshev polynomials and the number of nodes in Gauss quadrature formulas for calculating the specified integral. The behavior of the stress difference between the upper and lower crack faces as well as the distribution of another stress component on the crack extension is graphically illustrated in the vicinity of

the right tip. The dependence of these quantities on the values of the uniform shear stress specified on the crack edges is also illustrated. It is shown that the consideration of surface elasticity becomes especially noticeable when the crack length is less than a micrometer. Further decrease of this length leads to significant change of the character of the stress distribution in the vicinity of the crack tip. In particular, the square root singularity of the stresses at the crack tips, which is characteristic for the classical crack model, disappears and the stresses at these tips become finite.

Keywords: stresses, surface elasticity, crack, antiplane deformation, integro-differential equation, analytical method.

Клецьков Олександр Миколайович – аспірант кафедри теоретичної та комп’ютерної механіки, Дніпровський національний університет ім.Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2587-4647>

Шевельова Алла Євгенівна – д.ф.-м.н., професор, професор кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики, Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6688-0942>

Лобода Володимир Васильович – д.ф.-м.н., професор, професор кафедри теоретичної та комп’ютерної механіки, Дніпровський національний університет ім.Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0432-629X>

Kletskov Oleksandr – postgraduate student of the Department of Theoretical and Computational Mechanics, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2587-4647>

Sheveleva Alla – D.Sc., Professor, Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0432-629X>

Loboda Volodymyr - D.Sc., Professor, Professor of the Department of Theoretical and Computational Mechanics, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0432-629X>

**МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ
ЛОГІСТИЧНИХ ЦЕНТРІВ І ДВОЕТАПНОГО РОЗПОДІЛУ
МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ: СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД**

Анотація. Розглянуто двоетапний процес евакуації населення та розподілу матеріальних ресурсів у системі екстреної логістики, що включає пункти збору населення та центри евакуації. При цьому передбачається, що населення неперервно розподілене у межах регіону, а вибір місць збору та центрів здійснюється з урахуванням різних сценаріїв надзвичайних ситуацій і обмежень доступності територій та ресурсів. Метою роботи є забезпечення ефективної організації евакуаційних і матеріальних потоків шляхом розроблення математичної моделі та методів оптимізації, які дозволяють визначати координати, кількість та місткість пунктів збору і центри евакуації, а також раціонально розподіляти людські та матеріальні потоки між етапами.

Математичне забезпечення задачі базується на комбінованому використанні континуальних та дискретних підходів: населення та пункти збору розглядаються як неперервно розподілені в регіоні, а пункти безпечного перебування – як дискретні об'єкти. Модель дозволяє оптимально визначати, з яких областей населенню слід збиратися в конкретні пункти збору, та як потоки населення розподіляються до пунктів безпечно-го перебування з урахуванням таких факторів, як відстань та час переміщення, місткість об'єктів і різні сценарії надзвичайних ситуацій. Такий підхід формалізує двоетапний процес евакуації і забезпечує оцінку ключових логістичних показників системи.

Ключові слова: сценарний підхід, багатоетапні логістичні процеси, зонування територій, математична модель, оптимізація, задачі розміщення-розподілу, системний аналіз.

Постановка проблеми. Важливим напрямом сучасних наукових досліджень у галузі безпеки життєдіяльності є гуманітарна логістика, що зосереджена на проблемах реагування на надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру. У межах цього напрямку особлива увага приділяється раціональній організації евакуаційних процесів, плануванню руху людських і матеріальних потоків та зменшенню масштабів негативних наслідків надзвичайних подій.

Сукупність наукових підходів і практичних заходів, спрямованих на управління логістичними процесами в умовах обмеженого часу та високого рівня невизначеності, доцільно розглядати як екстрену логістику. Актуальність досліджень у сфері екстреної логістики зростає зі збільшенням кількості природних катастроф, техногенних аварій і

воєнних конфліктів, які супроводжуються значними соціально-економічними втратами. Додатковими чинниками ризику є зношеність об'єктів інфраструктури, ускладнення умов доступу до постраждалих територій та обмеженість ресурсів у кризових ситуаціях. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні ефективних моделей планування та управління евакуаційними і матеріальними потоками на регіональному рівні.

Організація екстреної логістики передбачає узгоджену взаємодію пунктів збору населення, розподільчих центрів, транспортних засобів і служб реагування, які спільно забезпечують виконання евакуаційних і забезпечувальних заходів у надзвичайних умовах. Ефективність такої організації значною мірою залежить від правильного вибору місць розташування ключових об'єктів та раціонального розподілу потоків між ними.

Як зазначено в [1], розподільча логістика на макрорівні вирішує питання визначення оптимальної кількості та місця розташування розподільчих центрів (складів) на території, що обслуговується; вибору схеми розподілу матеріального потоку; ряд інших завдань, пов'язаних з управлінням процесом проходження матеріального потоку по території району, області. Дана робота присвячена математичному моделюванню і оптимізації схеми двоетапного розподілу матеріальних або евакуаційних потоків та ефективної організації транспортних перевезень на випадок різних надзвичайних ситуацій на основі сценарного підходу.

Об'єкт дослідження – процеси екстреної логістики в умовах надзвичайних ситуацій.

Предмет дослідження – моделі та методи оптимального розміщення структурних елементів систем екстреної логістики з двоетапним розподілом матеріальних ресурсів в умовах невизначеності.

У дослідженні робиться спроба врахувати невизначеність, пов'язану з характером надзвичайних ситуацій, які можуть скластися в регіоні шляхом розгляду декількох можливих варіантів їх появи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичне і комп'ютерне моделювання логістичних процесів вносять важливий внесок у їх розуміння та оптимізацію, допомагають зацікавленим особам приймати раціональні рішення в умовах сучасної конкуренції та нестабільності. Наукові публікації останнього двадцятиріччя демонструють різноманітність підходів та методів, що застосовуються для вирішення проблем розміщення логістичних об'єктів, налагоджування зв'язків між ними. Розглянемо декілька досліджень, що демонструють широту та потужність математичного та алгоритмічного забезпечення багатоетапних процесів розподілу матеріальних потоків, зокрема в контексті евакуаційної логістики.

В роботі [2] розглядається задача евакуації населення в надзвичайних ситуаціях з урахуванням автобусної евакуації та перевантажень транспортної мережі, з акцентом на оптимальний вибір безпечних місць. Задача є дискретною оптимізаційною задачею на транспортній мережі, де місця укриттів обираються зі скінченної множини. Математична модель статті поєднує задачу розміщення об'єктів із моделлю транспортних потоків із урахуванням заторів, тоді як етап збору людей не моделюється. Для розв'язання

використано еволюційний метаевристичний алгоритм із локальним пошуком, що дозволяє знаходити наближені рішення для великорозмірних дискретних задач.

Дослідження [3] присвячена оптимізації розташування екстрених укриттів з урахуванням ризику повеней та ефективності евакуаційної інфраструктури в умовах стихійного лиха. Основна мета – зменшити відстань і нерівність доступу до укриттів, забезпечуючи ефективну послугу для населення в умовах надзвичайної ситуації. Модель є дискретною просторовою оптимізаційною задачею на мережі, де потенційні укриття й місця попиту мають ваги ризику (враховані через оцінку ризику повені), а ціль - мінімізувати врівноважені відстані евакуації й нерівності доступу. У цій роботі фокус на локалізації укриттів для пішої чи загальної евакуації, без явного моделювання етапу транспортування автобусами. Оптимізація здійснюється через еволюційний метаевристичний підхід для багатокритеріальних задач. Порівняно з існуючими конфігураціями укриттів, отриманий план значно зменшує сумарну евакуаційну відстань та нерівність доступу.

Автори статті [4] пропонують двокритеріальну оптимізаційну модель планування евакуації людей в умовах пандемії, яка одночасно мінімізує загальний час евакуації та ризик передачі вірусу в укриттях. Модель є дискретною, де кожному евакуйованому призначається шлях і укриття з урахуванням обмежень щодо місткості і розподілу навантаження для зниження ризику зараження. Робота зосереджена на розподілі населення між доступними укриттями і побудові маршрутів для мінімізації часу та ризику, без окремого етапу збору у фіксованих пунктах. Для розв'язання використовується DECON алгоритм, який дозволяє ефективно генерувати компромісні стратегії для великих сценаріїв евакуації, балансує швидкість і безпеку розміщення людей.

Робота [5] представляє нову оптимізаційну модель Quickest Evacuation Location Problem (QELP), яка одночасно вирішує розміщення сховищ і планування евакуації з урахуванням часу евакуації, бюджету та балансу завантаження укриттів. Модель представлена як задача змішаного цілочислового програмування з кількома цілями, використовується метод посиленних ϵ -обмежень та матевристика для великих сценаріїв. Розглядається динамічний потік на мережі.

Модель розміщення сховищ в контексті повеней, що враховує вразливість населення й різноманітні потреби, розглядається в роботі [6]. Застосовується мультиоб'єктне програмування та GIS-аналіз. В роботі робиться акцент на неоднорідності попиту та геопросторових даних.

У роботі [7] проведено аналіз умов розміщення та призначення сховищ після землетрусу з урахуванням таких критеріїв як доступність до доріг, наближеність до медичних установ, вразливість населення, місткість тощо. Використовуються методи CRITIC та TOPSIS для оцінювання потенційних місць, а далі – модель покриття зі зваженою місткістю для розподілу населення. Евакуація не поділяється чітко на етапи (збір, перевезення тощо), але зосереджується на мережевому аналізі доступності та вагових критеріях.

Робота [8] розширює класичну задачу розміщення-розподілу тим, що враховує залежний від часу попит на евакуацію, тобто кількість людей, які потребують укриття,

змінюється протягом доби залежно від часу. Це важливо, оскільки щільність населення не є сталою. Модель аналізує, які укриття відкривати за різних часових сценаріїв попиту, що дозволяє краще адаптувати плани для реального часу. У статті використовується динамічний розподіл точок попиту до укриттів.

Двофазну і двоетапну модель для просторового розміщення укриттів розглянуто у статті [9]. Перша фаза вирішує проблему базових укриттів, а друга – детальні розміщення з урахуванням потоків трафіку. Метод розв'язування поєднує генетичні алгоритми та трафік-аналіз, що дозволяє підвищити ефективність розміщення з оптимальним балансом між кількістю укриттів і загальною евакуаційною ефективністю.

Автори [10] розглядають задачу розміщення укриттів при великомасштабній евакуації як комбіновану проблему розміщення і маршрутизації з обмеженням місткості укриттів. Використовується поліпшений квантовий генетичний алгоритм, який дозволяє швидко знаходити ефективні схеми розподілу населення, зважаючи на загальну довжину евакуаційних маршрутів і рівномірність розподілу людей між укриттями для уникнення перевантажень.

У статті [11] розглядається оцінка моделі розміщення-розподілу для евакуації під впливом кількох загроз одночасно (наприклад, повені та зсуву). Автори аналізують, як зміна сценаріїв загроз змінює ефективність укриттів, і пропонують адаптивний підхід до вибору укриттів з урахуванням ризику від різних катастроф. Це дозволяє розробляти універсальні плани для мультиризикових середовищ.

Робота [12] пропонує багатоцільову DRO-модель для розміщення укриттів при невизначеному попиту. Модель мінімізує одночасно загальні витрати, евакуаційну відстань і кількість невлаштованих людей, враховуючи найгірші сценарії розподілу попиту. Підхід DRO відрізняється від звичайних стохастичних моделей тим, що він не потребує повної інформації про розподіл параметрів, а працює з нечіткими наборами розподілів. Це робить рішення стійкішими при високому ступені невизначеності.

У статті [13] розглядається вплив динаміки населення (наприклад, зміна присутніх осіб у різні часи доби) на оптимальне розміщення укриттів та їх розподіл. Автор показує, що використання лише статичних даних населення може призводити до менш ефективних рішень і що включення часових змін щільності населення може покращити розподіл укриттів, зменшивши відстані та перевантаження.

Дослідження [14] присвячене розробці ієрархічної моделі просторового розташування й розподілу евакуаційних укриттів з урахуванням динамічних потреб населення під час надзвичайних ситуацій. Пропонується двоетапний підхід: на першому етапі оптимізується розташування укриттів із мінімальними витратами, а на другому – розподіл населення із мінімізацією евакуаційних відстаней. Застосовано цільові функції та алгоритми для вирішення задачі розташування й розподілу з метою підвищення ефективності евакуаційної інфраструктури. Результати підкреслюють важливість інтегрованого підходу до планування укриттів та оцінки їх розподілу для зменшення часу евакуації та забезпечення кращого доступу населення до безпечних місць.

Робота [15] присвячена розробці багатокритеріальної двоетапної стохастичної моделі програмування для планування системи транспортування постраждалих після масштабних катастроф. Основна мета – мінімізувати кількість нерозміщених пацієнтів, додаткову кількість необхідних швидких та загальний час транспортування до лікарень, враховуючи невизначеність у доступності місць та змінні потреби. Модель застосовано до районів Стамбула, а рішення отримано методом покращеного ϵ -обмеження (AUGMECON2), що дозволяє оцінити ефективність рішень з огляду на час та рівність доступу до медичної допомоги.

Дослідження [16] присвячене розробці моделі проектування логістичної мережі типу «hub-and-spoke» для міського регіону з використанням підходу на основі кластеризації. Запропоновано багатоетапний метод, який включає кластеризацію для виявлення центрів (хабів) з метою мінімізації транспортних витрат, балансування попиту між хабами, а також вирішення задачі розташування об'єктів і маршрутизації транспортних засобів. Експериментальна оцінка на реальних даних для Хо-Ші-Міну показує, що запропонований підхід зменшує транспортні витрати і підвищує ефективність обслуговування.

Дана робота присвячена моделюванню двоетапного розподілу евакуаційних процесів. На відміну від моделей, які розроблено і представлено в роботі [17], тут розглядається єдина транспортно-логістична система, але потоки в ній розподіляються залежно від сценаріїв надзвичайних ситуацій, що можуть скластися в регіоні, за аналогією [16].

Мета дослідження. Створення ефективної системи екстреної логістики на випадок різних надзвичайних ситуацій в регіоні шляхом розроблення математичної моделі й методу оптимізації розміщення структурних елементів системи і двоетапного розподілу матеріальних потоків, яка дозволить за різних екстрених умов проводити організацію логістичних процесів, раціонально розподіляючи транспортні та матеріальні потоки.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо територію Ω деякого регіону країни, на якій можуть відбутися надзвичайні ситуації (НС) техногенного або природного характеру, внаслідок чого населення з постраждалої території повинно бути евакуйоване до сховищ або інших кінцевих пунктів. Евакуація здійснюється в два етапи: спочатку мешканці самостійно добираються до первинних місць збору, а потім організованими групами транспортуються до тимчасових пунктів розміщення населення (ТПР). Потрібно визначити оптимальні місця розміщення первинних пунктів збору та закріплених за ними зон евакуації, визначити обсяги евакуаційних потоків і розподілити їх між доступними кінцевими пунктами для кожного з можливих сценаріїв розвитку надзвичайної події (сценарії $s \in \bar{S}$). Метою є мінімізація середніх по всім сценаріям загальних витрат на евакуацію, які враховують сумарні зусилля мешканців, аби дібратися свого пункту збору (які пропорційні маршрутному часу або відстані), транспортування їх до ТПР, можливу потребу розширення місткості останніх.

На рис. 1 представлені два сценарії НС, можливі центри першого і другого етапів евакуації, при цьому пункти первинного збору є спільними для обох сценаріїв, а кінцеві

пункти є визначеними заздалегідь, але частина з них у разі окремих НС може бути недоступною.

Для побудови математичної моделі введемо такі позначення.

Нехай $\bar{S} = \{1, 2, \dots, S\}$ – множина можливих сценаріїв НС, кожен з яких визначається наступними параметрами: $\Omega \subset R^2$ – територія регіону; Ω^s – територія НС; $\Omega_i^s \subset \Omega^s$ – зона обслуговування місця збору τ_i^I для сценарію s ; $\rho^s(\cdot)$ – щільність населення, постраждалого у результаті НС за сценарієм s ; $\tau_i^I = (\tau_i^{I1}, \tau_i^{I2})$ – координати місця збору $i = 1, \dots, N$, які потрібно визначити; $\tau_j^{II} = (\tau_j^{II1}, \tau_j^{II2})$ – координати сховища $j = 1, \dots, M$ (заздалегідь відомі); b_i^I – базова пропускна здатність місця збору i ; b_j^{II} – місткість сховища j ; $\theta_j^s \in \{0, 1\}$ – доступність сховища j для сценарію s (1 – доступне, 0 – недоступне); y_i^s – коефіцієнт, у скільки разів можна змінити потужність місця збору i для сценарію s ; ω_i – відсоток від поточної потужності центру, на який можна максимально її збільшити; $c^s(x, \tau_i^I)$ – маршрутний час від точки $x \in \Omega_i^s$ до місця збору τ_i^I ; $c(\tau_i^I, \tau_j^{II})$ – вартість транспортування з місця збору τ_i^I до сховища τ_j^{II} ; $c_i^{\text{доп}}$ – додаткові витрати при розширенні потужності сховища місця збору, розраховані на одну одиницю ресурсу; q_s – ймовірність реалізації сценарію s , де $\sum_{i=1}^S q_i = 1$; v_{ij}^s – кількість людей, перевезених з місця збору τ_i^I до сховища τ_j^{II} для сценарію s ; $\beta_{1,2,3} \geq 0$ – коефіцієнти, які визначають пріоритетність витрат, і враховують приведення їх до безрозмірного вигляду.

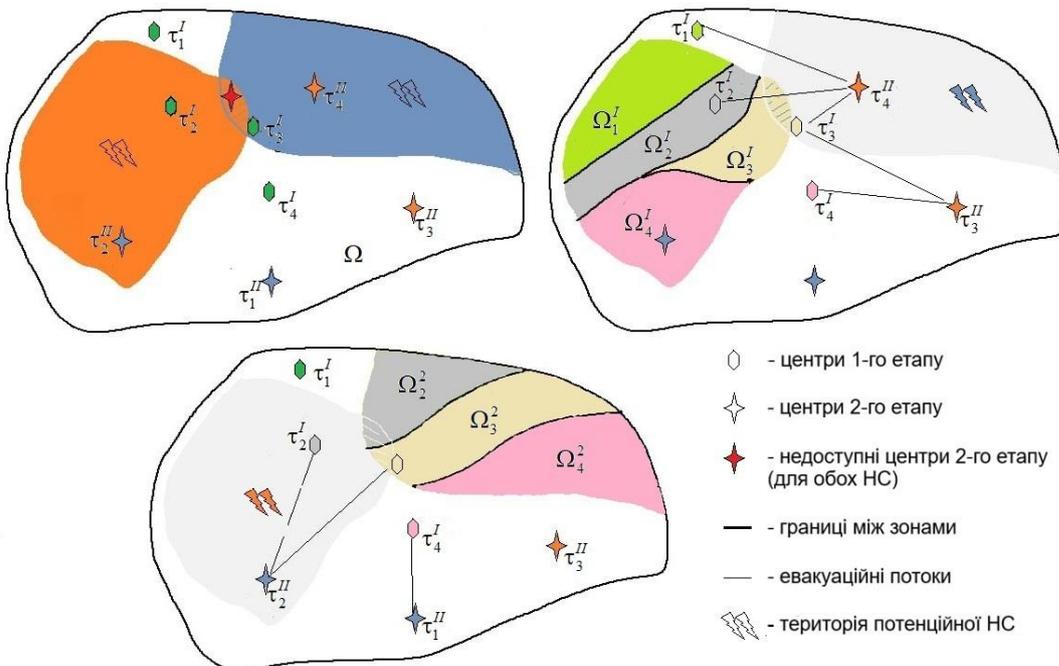


Рисунок 1 - Два сценарії НС, розміщення центрів і зонування території НС

Для кожного $s = 1, 2, \dots, S$ введемо до розгляду клас $\Sigma_{\Omega^s}^N$ – клас всіх можливих розбиттів множини Ω^s на N підмножин:

$$\Sigma_{\Omega^s}^N = \left\{ \bar{\zeta}_s = \{\Omega_1^s, \dots, \Omega_N^s\}: \bigcup_{i=1}^N \Omega_i^s = \Omega^s, \text{mes}(\Omega_i^s \cap \Omega_j^s) = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N} \right\}$$

і позначимо $\Sigma_{\{\Omega^1, \dots, \Omega^S\}}^N = \{\bar{\zeta} = \{\bar{\zeta}_1, \dots, \bar{\zeta}_S\}: \bar{\zeta}_s \in \Sigma_{\Omega^s}^N, s = \overline{1, S}\}$ клас всіх можливих розбиттів кожної із сукупності територій $\{\Omega^1, \dots, \Omega^S\}$ на N підмножин.

Математична постановка задачі розміщення первинних пунктів збору і двоетапного розподілу евакуаційних потоків з мінімізацією середніх за всіма можливими сценаріями НС загальних витрат записується у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \min_{\bar{\zeta}, \tau^I, y, v} F(\bar{\zeta}, \tau^I, y, v), \\ F(\bar{\zeta}, \tau^I, y, v) = \sum_{s=1}^S q_s \left(\beta_1 \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i^s} c^s(x, \tau_i^I) \rho^s(x) dx + \beta_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}^s \right. \\ \left. + \beta_3 \sum_{i=1}^N (y_i^s - 1) b_i^I c_i^{\text{доп}} \right), \end{aligned}$$

за умов на

- потужність місць збору:

$$\int_{\Omega_i^s} \rho^s(x) dx \leq y_i^s b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S} \quad (1)$$

- усі евакуйовані мешканці розподіляються за кінцевими пунктами:

$$\int_{\Omega_i^s} \rho^s(x) dx = \sum_{j=1}^M v_{ij}^s, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S} \quad (2)$$

- місткість кінцевих пунктів (сховищ):

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^s \leq \theta_j^s b_j^{II}, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad \forall s = \overline{1, S} \quad (3)$$

- розширення (у разі необхідності) місткості первинних пунктів:

$$1 \leq y_i^s \leq \left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right), \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S} \quad (4)$$

- зонування території:

$$\Omega^s = \bigcup_{i=1}^N \Omega_i^s, \quad \Omega_i^s \cap \Omega_k^s = \emptyset, \quad \forall i \neq k, \quad \forall s = \overline{1, S}. \quad (5)$$

$$\tau^I \in \Omega^N, \quad \Omega^N = \Omega \times \Omega \times \dots \times \Omega; \quad \bar{\zeta} \in \Sigma_{\{\Omega^1, \dots, \Omega^S\}}^N; \quad y \in R^{SN}, \quad (6)$$

$$v \in V, \quad (7)$$

$$V = \{v \in R^{SNM}: v_{ij}^s \geq 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad s = \overline{1, S}\}.$$

Легко показати, що умовою розв'язності задачі (1) – (5) є наступна подвійна нерівність:

$$\sum_{j=1}^M \theta_j^s b_j^{II} \geq \sum_{i=1}^N b_i^I \left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right) \geq \int_{\Omega} \rho^s(x) dx, \quad s = 1, 2, \dots, S. \quad (8)$$

Якщо кінцеві центри збору розташовані у безпечних для будь-якого сценарію місцях (всі $\theta_j^s = 1$), то умова (8) набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^M b_j^{II} \geq \sum_{i=1}^N b_i^I \geq \max_{s=\overline{1,S}} \int_{\Omega} \rho^s(x) dx \quad (9)$$

Зауваження. Для врахування максимально можливого часу евакуації до задачі (1) – (7) можна додати умову

$$\max_{x \in \Omega_i^s} c^s(x, \tau_i^I) \leq V_aver \cdot T_i^S, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

V_aver – середня швидкість людини.

Обґрунтування методу розв’язання задачі. Нехай виконуються умови (8). Введемо характеристичні функції підмножин Ω_i^s у вигляді:

$$\lambda_i^s(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega_i^s, \\ 0, & x \in \Omega^s \setminus \Omega_i^s, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \quad s = 1, 2, \dots, S.$$

Тоді функціонал F можна записати в еквівалентному вигляді:

$$F(\bar{\zeta}, \tau^I, y, v) = I((\lambda(\cdot), \tau^I, y, v)),$$

$$I((\lambda(\cdot), \tau^I, y, v)) =$$

$$= \sum_{s=1}^S q_s \sum_{i=1}^N \left(\beta_1 \int_{\Omega^s} c^s(x, \tau_i^I) \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx + \beta_2 \sum_{j=1}^M c(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}^s + \beta_3 (y_i^s - 1) b_i^I c_i^{\text{доп}} \right),$$

а інтеграли $\int_{\Omega^s} \rho^s(x) dx$ в обмеженнях (1), (2) замінити на $\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx$.

Задача А. Знайти

$$\min_{\lambda(\cdot), \tau^I, y, v} I(\lambda(\cdot), \tau^I, y, v), \quad (10)$$

за умов

$$\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx \leq y_i^s b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S}; \quad (11)$$

$$\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx = \sum_{j=1}^M v_{ij}^s, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S}; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^s \leq \theta_j^s b_j^{II}, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad \forall s = \overline{1, S}; \quad (13)$$

$$1 \leq y_i^s \leq \left(1 + \frac{\omega_i}{100}\right), \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad \forall s = \overline{1, S}; \quad (14)$$

$$y \in R^{SN}; \quad \lambda(\cdot) \in \Gamma_0, \quad (15)$$

$$\tau^I \in \Omega^N, \quad (16)$$

$$v \in V \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^s(x) = 1, \text{ м. в. для } x \in \Omega^s, s = \overline{1, S}, \quad (18)$$

$$\Gamma_0 = \{\lambda(\cdot) = (\lambda^1(\cdot), \dots, \lambda^S(\cdot)): \lambda^s(\cdot) \in \Gamma_1^s, \forall s = \overline{1, S}\},$$

$$\Gamma_1^s = \{\lambda^s(\cdot) = (\lambda_1^s(\cdot), \dots, \lambda_N^s(\cdot)): \lambda_i^s(x) = 0 \vee 1, i = \overline{1, N} \text{ м. в. для } x \in \Omega^s, \\ s = \overline{1, S}\}.$$

Від задача **A**, яка є задачею нескінченновимірною математичного програмування з булевими змінними $\lambda(\cdot)$, перейдемо до задачі зі значеннями компонент вектор-функції $\lambda(\cdot)$ на відріжку $[0, 1]$.

Задача Б. Знайти $\lambda^*(\cdot) \in \Gamma, \tau^{I*} \in \Omega^N, y^* \in R^{SN}, v^* \in V$, які мінімізують функціонал $I(\lambda(\cdot), \tau^I, y, v)$ за умов (11) – (18), а множина Γ визначається так:

$$\Gamma = \{\lambda(\cdot) = (\lambda^1(\cdot), \dots, \lambda^S(\cdot)): \lambda^s(\cdot) \in \Gamma_2^s, \forall s = \overline{1, S}\},$$

$$\Gamma_2^s = \{\lambda^s(\cdot) = (\lambda_1^s(\cdot), \dots, \lambda_N^s(\cdot)): 0 \leq \lambda_i^s(x) \leq 1, \text{ м. в. для } x \in \Omega^s, i = \overline{1, N}\} \\ \forall s = \overline{1, S}.$$

Зрозуміло, що

$$I((\lambda^*(\cdot), \tau^{I*}, y^*, v^*)) = \min_{(\tau^I, y, v) \in \Omega^N \times R^{SN} \times V} \left[\min_{\lambda(\cdot) \in \Gamma} I((\lambda(\cdot), \tau^I, y, v)) \right], \quad (19)$$

де мінімум праворуч обчислюється за допустимими наборами змінних величин. При кожному фіксованому допустимому наборі векторів $\tau^I \in \Omega^N, y \in R^{SN}, v \in V$, які мінімізують функціонал $I(\lambda(\cdot), \tau^I, y, v)$ за умов (11) – (18), внутрішня задача в (19) є розв'язною, адже мова йде про функціонал, який є сепарабельним, лінійним відносно кожної з компонент $\lambda^s(\cdot)$ вектор-функції $\lambda(\cdot)$ на опуклій, замкненій, обмеженій множині гільбертова простору $L_2^N(\Omega^s)$. Крім того, серед множини оптимальних розв'язків задачі **Б** є оптимальні розв'язки задачі **A**.

Для отримання необхідних і достатніх умов оптимальності для задачі **Б** введемо функціонал Лагранжа в наступному вигляді:

$$L(\{\lambda(\cdot), \tau^I, y, v\}, \{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\}) = \\ = \sum_{s=1}^S q_s \sum_{i=1}^N \left(\beta_1 \int_{\Omega^s} c^s(x, \tau_i^I) \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx + \beta_2 \sum_{j=1}^M c(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}^s + \beta_3 (y_i^s - \right. \\ \left. - 1) b_i^I c_i^{\text{доп}} \right) + \sum_{i=1}^N \psi_i^s \left(\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx - y_i^s b_i^I \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{s=1}^S \left(\sum_{i=1}^N \eta_i^s \left(\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \lambda_i^s(x) dx - \sum_{j=1}^M v_{ij}^s \right) + \sum_{j=1}^M \mu_j^s \left(\sum_{i=1}^N v_{ij}^s - \theta_j^s b_j^{II} \right) \right) + \\
 & + \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \psi_0^s(x) \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i^s(x) - 1 \right) dx = \\
 & = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \int_{\Omega^s} ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^I) + \psi_i^s + \eta_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x)) \lambda_i^s(x) dx + \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_2 q_s c(\tau_i^I, \tau_j^{II}) - \eta_i^s + \mu_j^s) v_{ij}^s + \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N (\beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I) y_i^s - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^M (\mu_j^s \theta_j^s b_j^{II}) - \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \psi_0^s(x) dx - \beta_3 \sum_{i=1}^N b_i^I c_i^{\text{доп}},
 \end{aligned}$$

де $\lambda(\cdot) \in \Gamma, \tau^I \in \Omega^N, y \in Y,$

$Y = \{y \in R^{SN}, 1 \leq y_i^s \leq (1 + \frac{\omega_i}{100}) \quad i = \overline{1, N}, s = \overline{1, S}\}, v \in V,$ набір двоїстих змінних

них $\{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\} \in \Lambda,$

$$\Lambda = \{(\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu): \Psi_0(\cdot) = (\psi_0^1(\cdot), \dots, \psi_0^S(\cdot)), \psi_0^s(\cdot) \in L_{\Omega^s}^2 \quad \forall s = \overline{1, S}; \psi \in E_{SN}, \psi_i^s \geq 0 \quad \forall i, s; \eta \in E_{SN}; \mu \in E_{SM}, \mu_j^s \geq 0 \quad \forall j, s\}$$

Пару наборів змінних $(\{\lambda^*(\cdot), \tau^{I*}, y^*, v^*\}, \{\Psi_0^*(\cdot), \psi^*, \eta^*, \mu^*\})$ будемо називати

сідловою точкою функціоналу L на множині $\{\Gamma \times \Omega^N \times Y \times V\} \times \Lambda,$ якщо

$$\begin{aligned}
 L(\{\lambda^*(\cdot), \tau^{I*}, y^*, v^*\}, \{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\}) & \leq L(\{\lambda^*(\cdot), \tau^{I*}, y^*, v^*\}, \{\Psi_0^*(\cdot), \psi^*, \eta^*, \mu^*\}) \leq \\
 & \leq L(\{\lambda(\cdot), \tau^I, y, v\}, \{\Psi_0^*(\cdot), \psi^*, \eta^*, \mu^*\})
 \end{aligned}$$

для всіх $\lambda(\cdot) \in \Gamma, \tau^I \in \Omega^N, y^s \in Y, v \in V, \{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\} \in \Lambda.$

Задача, двоїста до задачі **Б**, формулюється так:

$$H(\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu) = \min_{(\lambda(\cdot), \tau^I, y, v) \in \Gamma \times \Omega^N \times Y \times V} L \rightarrow \max_{(\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu) \in \Lambda}$$

(20)

Справедливою є теорема двоїстості, згідно якої щоб задачі **Б** та (20) були пов'язані співвідношенням двоїстості $I_* = H^*,$ та верхня грань в (20) була досяжною, необхідно і достатньо існування сідлової точки функціоналу $L(\{\lambda(\cdot), \tau^I, y, v\}, \{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\})$ на множині $\{\Gamma \times \Omega^N \times Y \times V\} \times \Lambda.$ А, отже, розв'язання пари задач **Б** та (20) еквівалентно пошуку сідлової точки функціоналу L на вказаній множині.

Нехай у функціоналі $L(\{\lambda(\cdot), \tau^l, y, v\}, \{\Psi_0(\cdot), \psi, \eta, \mu\})$ вектори $\tau^l = \bar{\tau}^l, y = \bar{y}, v = \bar{v}, \psi = \bar{\psi}, \eta = \bar{\eta}, \mu = \bar{\mu}$ є довільними допустимими, але фіксованими. Позначимо

$$W(\lambda(\cdot), \Psi_0(\cdot)) = L(\{\lambda(\cdot), \bar{\tau}^l, \bar{y}, \bar{v}\}, \{\Psi_0(\cdot), \bar{\psi}, \bar{\eta}, \bar{\mu}\}).$$

Розглянемо задачу

$$W(\lambda(\cdot), \Psi_0(\cdot)) \rightarrow \min_{\lambda(\cdot) \in \Gamma} \max_{\Psi_0(\cdot) \in \Phi}, \quad (21)$$

де $\Phi = \{\Psi_0(\cdot) = (\psi_0^1(\cdot), \dots, \psi_0^S(\cdot)), \psi_0^s(\cdot) \in L_{\Omega^s}^2 \forall s = \overline{1, S}\}$.

Для кожної довільної фіксованої точки $x \in \hat{\Omega}$, де $\hat{\Omega} = \bigcup_{s=1}^S \Omega^s$, введемо до розгляду функцію $(SN+S)$ змінних:

$$Q(\lambda(x), \Psi_0(x)) = \sum_{s=1}^S \left\{ \sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^l) + \psi_i^s + \eta_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x)) \lambda_i^s(x) - \psi_0^s(x) \right\}.$$

Ця функція визначена на декартовому добутку $\Gamma_x \times \Phi_x$ проєкцій множин Γ та Φ для $x \in \hat{\Omega}$.

Теорема 1. Для того щоб допустима пара $(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) \in \Gamma \times \Phi$ була розв'язком задачі (21), необхідно і достатньо, аби майже всюди для $x \in \hat{\Omega}$, виконувалась наступна умова:

$$Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) = \max_{\Psi_0(x) \in \Phi_x} \min_{\lambda(x) \in \Gamma_x} Q(\lambda(x), \Psi_0(x)). \quad (22)$$

Доведення. Необхідність. Нехай $(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) \in \Gamma \times \Phi$ – оптимальний розв'язок задачі (21), тобто $\forall \lambda(\cdot) \in \Gamma, \Psi_0(\cdot) \in \Phi$

$$W(\hat{\lambda}(\cdot), \Psi_0(\cdot)) \leq W(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)), \quad (23)$$

$$W(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) \leq W(\lambda(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)). \quad (24)$$

Покажемо, що майже всюди для $x \in \hat{\Omega}$ ця пара $(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot))$ задовольняє умову (23). Припустимо протилежне: існує і підмножина $\tilde{\Omega}$ множини $\hat{\Omega}$ така, що $mes(\tilde{\Omega}) > 0$ та $\forall x \in \tilde{\Omega}$ умова (23) не виконується, тобто $\forall x \in \tilde{\Omega}$ існує $\check{\lambda}(x) \in \Gamma_x$, для якої справедливою є нерівність:

$$Q(\check{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) < Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)).$$

Складемо нову пару допустимих функцій для задачі (21):

$$(\bar{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) = \begin{cases} (\bar{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) \in \Gamma_x \times \Phi_x, & \forall x \in \tilde{\Omega}, \\ (\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) \in \Gamma_x \times \Phi_x, & \forall x \in \hat{\Omega} \setminus \tilde{\Omega}. \end{cases}$$

Інтегруючи $Q(\bar{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x))$ по всій області $\hat{\Omega}$ та додаючи константу D , яка дорівнює

$$D = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_2 q_s c(\tau_i^I, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s) \bar{v}_{ij}^s + \\ + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N (\beta_3 q_s - \bar{\psi}_i^s b_i^I) \bar{y}_i^s - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^M (\bar{\mu}_j^s \theta_j^s b_j^{II}) - \beta_3 \sum_{i=1}^N b_i^I c_i^{\text{доп}},$$

отримуємо:

$$W(\bar{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) = \int_{\hat{\Omega}} Q(\bar{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) dx + D = \\ = \int_{\hat{\Omega}} Q(\bar{\lambda}(x), \Psi(x)) dx + \int_{\hat{\Omega} \setminus \tilde{\Omega}} Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) dx + D.$$

Розіб'ємо аналогічним чином інтеграл у функціоналі $W(\lambda(\cdot), \Psi_0(\cdot))$ при $\lambda(\cdot) = \hat{\lambda}(\cdot), \Psi_0(\cdot) = \hat{\Psi}_0(\cdot)$ та порівнюємо праві частини отриманих співвідношень, приходимо до висновку:

$$W(\bar{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) < W(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)),$$

що протирічить (24).

Аналогічно, можна припустити існування підмножини $\tilde{\Omega}$ множини $\hat{\Omega}$ такої, що $mes(\tilde{\Omega}) > 0$ та $\forall x \in \tilde{\Omega}$ існує $\Psi_0(x) \in \Phi_x$ має місце нерівність

$$Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) < Q(\hat{\lambda}(x), \Psi_0(x)).$$

Тоді на парі $(\hat{\lambda}(x), \bar{\Psi}_0(x))$, визначеній наступним чином

$$(\hat{\lambda}(x), \bar{\Psi}_0(x)) = \begin{cases} (\hat{\lambda}(x), \bar{\Psi}_0(x)) \in \Gamma_x \times \Phi_x, & \forall x \in \tilde{\Omega} \\ (\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) \in \Gamma_x \times \Phi_x, & \forall x \in \hat{\Omega} \setminus \tilde{\Omega} \end{cases}$$

буде порушуватись умова (24). Отримане протиріччя доводить необхідність умови (22) аби пара $(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot))$ була розв'язком задачі (21).

Достатність. Нехай пара $(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot))$ задовольняє умову (22) майже всюди для $x \in \hat{\Omega}$. Покажемо, що вона є розв'язком задачі (21).

Нехай для $x \in \hat{\Omega}$ $\lambda(x) \in \Gamma_x, \Psi_0(x) \in \Phi_x$. Тоді майже для всіх $x \in \hat{\Omega}$

$$Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) \leq Q(\lambda(x), \hat{\Psi}_0(x)),$$

$$Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) \geq Q(\hat{\lambda}(x), \Psi_0(x)).$$

Інтегруючи ці нерівності за всіма $x \in \hat{\Omega}$ та враховуючи те, що нерівність може не виконуватись лише на множині тих точок з $\hat{\Omega}$, значення підінтегральної функції в яких не впливає на величину інтегралу, отримаємо:

$$\int_{\hat{\Omega}} Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) dx \leq \int_{\hat{\Omega}} Q(\lambda(x), \hat{\Psi}_0(x)) dx,$$

$$\int_{\hat{\Omega}} Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) dx \geq \int_{\hat{\Omega}} Q(\hat{\lambda}(x), \Psi_0(x)) dx.$$

З оглядом на склад множини $\hat{\Omega} = \bigcup_{s=1}^S \Omega^s$ і означення характеристичних функцій множин Ω^s , з цього випливає:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \left\{ \sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x)) \hat{\lambda}_i^s(x) - \hat{\psi}_0^s(x) \right\} dx \leq \\ & \leq \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \left\{ \sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x)) \lambda_i^s(x) - \hat{\psi}_0^s(x) \right\} dx; \\ & \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \left\{ \sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x)) \hat{\lambda}_i^s(x) - \hat{\psi}_0^s(x) \right\} dx \geq \\ & \geq \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \left\{ \sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x)) \hat{\lambda}_i^s(x) - \psi_0^s(x) \right\} dx. \end{aligned}$$

Додаючи праворуч та ліворуч в отриманих нерівностях константу D , отримаємо нерівності (23), (24).

Теорему доведено.

Вище задачу **A** редуковано до задачі **B**. Теорема двоїстості зводить розв'язання останньої до пошуку сідлової точки її функціоналу Лагранжа. Зафіксуємо у ньому вектори $\tau^l = \bar{\tau}^l$, $y = \bar{y}$, $v = \bar{v}$, $\psi = \bar{\psi}$, $\eta = \bar{\eta}$, $\mu = \bar{\mu}$, які є довільними, але допустимими. Тоді, згідно теореми 2, для визначення решти компонент сідлової точки функціоналу Лагранжа потрібно для кожної точки x з $\hat{\Omega} = \bigcup_{s=1}^S \Omega^s$ розв'язати задачу (22).

Нехай x – довільна фіксована точка з $\hat{\Omega}$. У силу сепарабельності функції $Q(\lambda(x), \Psi_0(x))$ відносно сукупності своїх змінних, має місце наступна рівність:

$$\max_{\psi_0(x) \in \Phi_x} \min_{\lambda(x) \in \Gamma_x} Q(\lambda(x), \Psi_0(x)) =$$

$$= \sum_{s=1}^S \max_{\psi_0^s(x)} \left\{ \min_{0 \leq \lambda_k^s(x) \leq 1, \forall k, s} \left(\sum_{i=1}^N ((\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x)) \lambda_i^s(x) \right) - \psi_0^s(x) \right\}.$$

Точка $(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x))$ буде розв'язком задачі (22) тоді і лише тоді, коли виконуватимуться умови:

1. $Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) = \min_{\lambda(x) \in \Gamma_x} Q(\lambda(x), \hat{\Psi}_0(x))$;
2. $\frac{\partial Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x))}{\psi_0^s(x)} = 0 \quad \forall s = \overline{1, S} \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N \lambda_i^s(x) - 1 = 0$.

Для довільної $\Psi_0(x)$ функція $Q(\lambda(x), \Psi_0(x))$ досягає свого мінімального значення за всіма $\lambda(x) \in \Gamma_x$, де

$$\Gamma_x = \{\lambda = (\lambda^1, \dots, \lambda^S) : \lambda^s \in \Gamma_{2x}^s, \quad \forall s = \overline{1, S}\},$$

$$\Gamma_{2x}^s = \{\lambda^s = (\lambda_1^s, \dots, \lambda_N^s) : 0 \leq \lambda_i^s \leq 1, i = \overline{1, N}\} \quad \forall s = \overline{1, S},$$

в точці $\hat{\lambda}(x)$, чий компоненти задовольняють умови: для всіх $s = \overline{1, S}$ і $x \in \Omega^s$

$$\hat{\lambda}_i^s(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) < 0, \\ 0, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) > 0, \\ \alpha \in [0, 1], & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) = 0. \end{cases} \quad (28)$$

Серед усіх розв'язків задачі **Б** розглянемо ті, які є крайніми точками допустимої множини її розв'язків (у силу довільності вибору значення $\alpha \in [0, 1]$), а саме: для : для всіх $s = \overline{1, S}$ і $x \in \Omega^s$

$$\hat{\lambda}_i^s(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) < 0, \\ 0, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) > 0, \\ \alpha \in 0 \vee 1, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \psi_0^s(x) = 0. \end{cases} \quad (29)$$

Для $\psi_0^s(x) = \hat{\psi}_0^s(x)$ в нерівності (28), зокрема (29), має місце рівність:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i^s(x) - 1 = 0.$$

З цього випливає, що серед компонент вектора $\hat{\lambda}^s(x)$ в (29) існує лише одна одинична компонента, нехай її номер l , тоді цю формулу можна записати так:

$$\hat{\lambda}_i^s(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x) = \\ & = \min_{i=1, N} ((\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x)), \\ 0 & \text{у протилежному випадку} \end{cases} \quad \forall l = \overline{1, N}. \quad (30)$$

Підставляючи (30) і $\Psi_0(x) = \hat{\Psi}_0(x)$ в функцію $Q(\lambda(x), \Psi_0(x))$, отримаємо:

$$\begin{aligned} Q(\hat{\lambda}(x), \hat{\Psi}_0(x)) &= \sum_{s=1}^S \left\{ \min_{i=1, N} ((\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) + \hat{\psi}_0^s(x)) - \hat{\psi}_0^s(x) \right\} = \\ &= \sum_{s=1}^S \min_{i=1, N} (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x). \end{aligned}$$

В силу довільності вибору точки x , оптимальне значення функціоналу задачі (21) при фіксованих векторах $\tau^l = \bar{\tau}^l$, $y = \bar{y}$, $v = \bar{v}$, $\psi = \bar{\psi}$, $\eta = \bar{\eta}$, $\mu = \bar{\mu}$ запишеться у такий спосіб:

$$\begin{aligned} G(\bar{\tau}^l, \bar{y}, \bar{v}; \bar{\psi}, \bar{\eta}, \bar{\mu}) &= W(\hat{\lambda}(\cdot), \hat{\Psi}_0(\cdot)) = \\ &= \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \min_{i=1, N} (\beta_1 q_s c^s(x, \bar{\tau}_i^l) + \bar{\psi}_i^s + \bar{\eta}_i^s) \rho^s(x) dx + \\ &+ \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^l, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s) v_{ij}^s + \\ &+ \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N (\beta_3 q_s - \bar{\psi}_i^s b_i^I) \bar{y}_i^s - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^M (\bar{\mu}_j^s \theta_j^s b_j^{II}) - \beta_3 \sum_{i=1}^N b_i^I c_i^{\text{доп}}. \end{aligned}$$

У силу довільності вибору векторів $\bar{\tau}^l, \bar{y}, \bar{v}; \bar{\psi}, \bar{\eta}, \bar{\mu}$, з урахуванням отриманого виразу уточним задачу (20):

$$\begin{aligned} \bar{H}(\psi, \eta, \mu) &\rightarrow \max_{\psi \geq 0, \eta, \mu} \\ \bar{H}(\psi, \eta, \mu) &= \min_{(\tau^l, y, v) \in \Omega^N \times Y \times V} G(\tau^l, y, v; \psi, \eta, \mu). \end{aligned} \quad (31)$$

Другий доданок у виразі G можна конкретизувати, позаяк мінімальне його значення досягається за таких значень y_i^s (при решті – фіксованих): для усіх $s = \overline{1, S}$ і $i = \overline{1, N}$

$$\hat{y}_i^{s*} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I \geq 0, \\ 1 + \frac{\omega_i}{100}, & \text{якщо } \beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I < 0. \end{cases}$$

При цьому

$$\sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N (\beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I) y_i^{s*} = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \left(\beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I + \frac{\omega_i}{100} \min(0, \beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I) \right).$$

Нехай тепер в задачі (31) усі параметри, крім v , є фіксованими. Тоді:

$$\begin{aligned} \min_{v \geq 0} \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s) v_{ij}^s = \\ = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s \geq 0, \\ -\infty, & \text{якщо } \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Величини v_{ij}^{s*} , за яких досягається мінімальне за v_{ij}^s значення в функції

$G(\bar{\tau}^I, \bar{y}, v; \bar{\psi}, \bar{\eta}, \bar{\mu})$, задовольняють умову:

$$v_{ij}^{s*} = \begin{cases} > 0, & \text{якщо } \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) = \bar{\eta}_i^s - \bar{\mu}_j^s, \\ 0, & \text{якщо } \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) > \bar{\eta}_i^s - \bar{\mu}_j^s. \end{cases}$$

Кожна нерівність із наступної системи

$$\beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}) - \bar{\eta}_i^s + \bar{\mu}_j^s \geq 0 \text{ або, що те саме,}$$

$$\bar{\mu}_j^s \geq \bar{\eta}_i^s - \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II}), \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}, \quad s = \overline{1, S}$$

виконується, якщо

$$\bar{\mu}_j^s = \max_{i=1, N} (\bar{\eta}_i^s - \beta_2 q_s c(\bar{\tau}_i^I, \tau_j^{II})), \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad s = \overline{1, S}.$$

А отже, підставляючи отримані вирази у G , задача (31) при довільних значеннях решти змінних набуває вигляду:

$$Q(\psi, \eta) \rightarrow \max_{\psi \in R^N}, \tag{32}$$

$$Q(\psi, \eta) = \min_{\tau^I \in \Omega^N} G_1(\tau^I, \psi, \eta),$$

де

$$\begin{aligned} G_1(\tau^I, \psi, \eta) = \sum_{s=1}^S \int_{\Omega^s} \min_{i=1, N} (\beta_1 q_s c^s(x, \tau_i^I) + \psi_i^s + \eta_i^s) \rho^s(x) dx + \\ + \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^N \left(\beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I + \frac{\omega_i}{100} \min(0, \beta_3 q_s - \psi_i^s b_i^I) \right) - \\ - \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^M \theta_j^s b_j^{II} \max_{i=1, N} (\eta_i^s - \beta_2 q_s c(\tau_i^I, \tau_j^{II})) - \beta_3 \sum_{i=1}^N b_i^I c_i^{\text{доп}}. \end{aligned}$$

Отже, наведені міркування є доведенням наступної теореми.

Теорема 2. Нехай в задачі **A** функції $\rho^s(x) \geq 0$ для усіх $x \in \Omega, s = \overline{1, S}$. Оптимальний розв'язок задачі **A** визначається наступними умовами:

1) характеристичні функції підмножин, що складають оптимальне розбиття на N підмножин кожна з множин $\Omega^s, s = \overline{1, S}$:

$$\hat{\lambda}_i^s(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \beta_1 q_s c^s(x, \hat{\tau}_i^I) + \hat{\psi}_i^s + \hat{\eta}_i^s = \min_{i=\overline{1, N}} ((\beta_1 q_s c^s(x, \hat{\tau}_i^I) + \hat{\psi}_i^s + \hat{\eta}_i^s), \\ 0 & \text{у протилежному випадку} \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, N};$$

2) змінні розширення потужностей (місткості) центрів першого етапу: для усіх $s = \overline{1, S}$ і $i = \overline{1, N}$

$$\hat{y}_i^{s*} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \beta_3 q_s - \hat{\psi}_i^s b_i^I \geq 0, \\ 1 + \frac{\omega_i}{100}, & \text{якщо } \beta_3 q_s - \hat{\psi}_i^s b_i^I < 0; \end{cases}$$

3) $\hat{\tau}_i^I, \hat{\psi}_i^s, \hat{\eta}_i^s$, для усіх $s = \overline{1, S}$ і $i = \overline{1, N}$ є розв'язком задачі (32);

4) для виявлення зв'язків між центрами першого і другого етапів, тобто пошуку оптимальних величин \hat{v}_{ij}^s потоків ресурсу між ними для кожного сценарію $s = \overline{1, S}$ слід розв'язати наступну задачу лінійного програмування транспортного типу:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}^s \rightarrow \min_{v^s \in R_{NM}^+},$$

за умов

$$\int_{\Omega^s} \rho^s(x) \hat{\lambda}_i^s(x) dx = \sum_{j=1}^M v_{ij}^s, \quad \forall i = \overline{1, N},$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^s \leq \theta_j^s b_j^{II}, \quad \forall j = \overline{1, M};$$

$$v_{ij}^s \geq 0, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}.$$

Отже, математичне забезпечення задачі розміщення проміжних логістичних центрів і двоетапного розподілу ресурсів в умовах невизначеності, пов'язаної з ймовірністю появи різних надзвичайних ситуацій, розроблено з використанням основних положень теорії неперервних лінійних задач оптимального розбиття множин і теорії двоїстості. Застосування запропонованого підходу дає можливість знайти оптимальний розв'язок двоетапної задачі розміщення-розподілу з урахуванням різних сценаріїв НС в аналітичному вигляді. При цьому певна частина його параметрів є розв'язком допоміжної оптимізаційної задачі з негладкою цільовою функцією багатьох змінних. Ітераційний алгоритм розв'язання задачі може бути розроблений на основі інтеграції сучасних методів негладкої оптимізації та лінійного програмування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі запропоновано математичну модель оптимізації системи екстреної логістики з двоетапним розподілом людських і матеріальних потоків, яка поєднує неперервний просторовий розподіл населення з вибором пунктів збору та безпечних центрів і враховує різні сценарії виникнення надзвичайних ситуацій.

Розроблений підхід дозволяє визначати оптимальні місця збору населення, відповідні зони їх евакуації та раціонально розподіляти людські потоки між логістичними центрами з урахуванням відстані, часу переміщення та транспортних обмежень. Запропоновані математичні постановки та методи можуть бути використані для оцінювання часу евакуації та аналізу наслідків реалізації різних сценаріїв надзвичайних ситуацій органами управління та службами реагування.

Робота виконана в рамках державної бюджетної наукової тематики 0125U000080 «Математичне і комп'ютерне моделювання раціонального розподілу матеріальних ресурсів у багаторівневих транспортно-логістичних системах».

ЛІТЕРАТУРА

1. Коряшкіна Л. С., Лубенець Д. Є. (2024). Системний аналіз та математичне моделювання частково-двоетапних процесів розподілу матеріальних потоків. *System technologies*, 1(150), 86–99. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-08>
2. Woo S.-J., Kang S. (2025). Optimising shelter locations for bus evacuation and relief supply under traffic congestion. *IET Intelligent Transport Systems*, 19. <https://doi.org/10.1049/itr2.70020>
3. Zhang D., Wang J. (2025). Research on the optimization of urban emergency shelters considering flood disaster risks. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2585171>
4. Dulebenets M. A., Ozguven E. E., Khayamim R. (2025). A bi-objective optimization approach for emergency evacuation planning under pandemic settings. *Technical report submitted to the Rural Equitable and Accessible Transportation (REAT) Center and United States Department of Transportation*, Tallahassee, FL, USA, 69 p.
5. Feng X., Ruiz-Hernandez D., Sgalambro A. (2025). On the quickest evacuation location problem in humanitarian operations: multi-objective modelling and matheuristic solution. *European Journal of Operational Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.10.046>
6. Gong Z., Guo X., Wei G., Luo X., Xu X. (2025). Flood evacuation shelter location-allocation considering vulnerability identification in the context of prerequisite. *Climate Services*, 40, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100617>
7. Dehnavi Eelagh M., Abbaspour R. A. (2024). A location-allocation optimization model for post-earthquake emergency shelters using network-based multi-criteria decision-making. *Decision Analytics Journal*, 10, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100430>
8. Tun E., Nishikiori T., Varghese V., Chikaraishi M., Seike M., Fujiwara A. (2024). Emergency shelter location-allocation analysis with time-varying demand. *Asian Transport Studies*, 10, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2024.100152>
9. Zhang Y., Chen W., Zhong G., Zhai G., Zhai W. (2024). A two-phase and bi-level spatial configuration methodology of shelters based on a circular assignment model and evacuation

traffic flow allocation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 455. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120455>

10. Yin Y., Zhao X., Lv W. (2023). Emergency shelter allocation planning technology for large-scale evacuation based on quantum genetic algorithm. *Frontiers in Public Health*, 10, 1098675. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1098675>

11. Bera S., Gnyawali K. R., Dahal K., Melo R., Miao L., Guru B., Ramana G. V. (2023). Assessment of shelter location-allocation for multi-hazard emergency evacuation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84, 103435. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103435>

12. Tang K., Osaragi T. (2024). Multi-Objective Distributionally Robust Optimization for Earthquake Shelter Planning Under Demand Uncertainties. *GeoHazards*, 5(4), 1308–1325. <https://doi.org/10.3390/geohazards5040062>

13. Batsaris M. (2025). Incorporating population dynamics in the context of earthquake shelter location-allocation analysis. *European Journal of Geography*, 16(2), 52–65. <https://doi.org/10.48088/ejg.m.bat.16.2.052.065>

14. Zhong G., Zhai G., Shang K., Chen W. (2022). A two-stage hierarchical model for spatial location and evacuation allocation problem of urban earthquake shelters: a case study in Central urban area of Yangbi county, Yunnan province, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2098067. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2098067>

15. Caglayan N., Satoglu S. I. (2021). Multi-Objective Two-Stage Stochastic Programming Model for a Proposed Casualty Transportation System in Large-Scale Disasters: A Case Study. *Mathematics*, 9(4), 316. <https://doi.org/10.3390/math9040316>

16. Duong Q., Nguyen D., Nguyen Q. (2021). Hub and Spoke Logistics Network Design for Urban Region with Clustering-Based Approach. *Proceedings of the 34th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2021)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03080>

17. Koriashkina L., Us S., Odnovol M., Stanina O., Dziuba S. (2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 130–139. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/130>

REFERENCES

1. Koriashkina L. S., Lubenets D. Ye. (2024). Systems analysis and mathematical modeling of partially two-stage processes of material flow distribution. *System technologies*, 1(150), 86–99. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-1-150-2024-08>

2. Woo S.-J., Kang S. (2025). Optimising shelter locations for bus evacuation and relief supply under traffic congestion. *IET Intelligent Transport Systems*, 19. <https://doi.org/10.1049/itr2.70020>

3. Zhang D., Wang J. (2025). Research on the optimization of urban emergency shelters considering flood disaster risks. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2585171>

4. Dulebenets M. A., Ozguven E. E., Khayamim R. (2025). A bi-objective optimization approach for emergency evacuation planning under pandemic settings. *Technical report submitted to the Rural Equitable and Accessible Transportation (REAT) Center and United States Department of Transportation*, Tallahassee, FL, USA, 69 p.

5. Feng X., Ruiz-Hernandez D., Sgalambro A. (2025). On the quickest evacuation location problem in humanitarian operations: multi-objective modelling and matheuristic solution. *European Journal of Operational Research*, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2025.10.046>
6. Gong Z., Guo X., Wei G., Luo X., Xu X. (2025). Flood evacuation shelter location-allocation considering vulnerability identification in the context of prerequisite. *Climate Services*, 40, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100617>
7. Dehnavi Eelagh M., Abbaspour R. A. (2024). A location-allocation optimization model for post-earthquake emergency shelters using network-based multi-criteria decision-making. *Decision Analytics Journal*, 10, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100430>
8. Tun E., Nishikiori T., Varghese V., Chikaraishi M., Seike M., Fujiwara A. (2024). Emergency shelter location–allocation analysis with time–varying demand. *Asian Transport Studies*, 10, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2024.100152>
9. Zhang Y., Chen W., Zhong G., Zhai G., Zhai W. (2024). A two-phase and bi-level spatial configuration methodology of shelters based on a circular assignment model and evacuation traffic flow allocation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 455. <https://doi.org/10.3390/ijgi13120455>
10. Yin Y., Zhao X., Lv W. (2023). Emergency shelter allocation planning technology for large-scale evacuation based on quantum genetic algorithm. *Frontiers in Public Health*, 10, 1098675. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1098675>
11. Bera S., Gnyawali K. R., Dahal K., Melo R., Miao L., Guru B., Ramana G. V. (2023). Assessment of shelter location-allocation for multi-hazard emergency evacuation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84, 103435. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103435>
12. Tang K., Osaragi T. (2024). Multi-Objective Distributionally Robust Optimization for Earthquake Shelter Planning Under Demand Uncertainties. *GeoHazards*, 5(4), 1308–1325. <https://doi.org/10.3390/geohazards5040062>
13. Batsaris M. (2025). Incorporating population dynamics in the context of earthquake shelter location-allocation analysis. *European Journal of Geography*, 16(2), 52–65. <https://doi.org/10.48088/ejg.m.bat.16.2.052.065>
14. Zhong G., Zhai G., Shang K., Chen W. (2022). A two-stage hierarchical model for spatial location and evacuation allocation problem of urban earthquake shelters: a case study in Central urban area of Yangbi county, Yunnan province, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 2098067. <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2098067>
15. Caglayan N., Satoglu S. I. (2021). Multi-Objective Two-Stage Stochastic Programming Model for a Proposed Casualty Transportation System in Large-Scale Disasters: A Case Study. *Mathematics*, 9(4), 316. <https://doi.org/10.3390/math9040316>
16. Duong Q., Nguyen D., Nguyen Q. (2021). Hub and Spoke Logistics Network Design for Urban Region with Clustering-Based Approach. *Proceedings of the 34th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2021)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03080>
17. Koriashkina L., Us S., Odnovol M., Stanina O., Dziuba S. (2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system’s structural

***Mathematical modeling of the location of logistics centers
and two-stage distribution of material flows: a scenario approach***

The two-stage process of population evacuation and distribution of material resources in an emergency logistics system, which includes population collection points and evacuation centers, is examined. It is assumed that the population is continuously distributed across the region, while the selection of collection points and evacuation centers is carried out considering various emergency scenarios and constraints on territory accessibility and available resources. The aim of the study is to ensure the efficient organization of evacuation and material flows by developing a mathematical model and optimization methods that allow determining the coordinates, number, and capacity of collection points and evacuation centers, as well as rationally allocating human and material flows between stages.

The mathematical formulation of the problem is based on a combined use of continuous and discrete approaches: the population and collection points are considered continuously distributed within the region, whereas safe stay points are treated as discrete objects. The model enables the optimal determination of areas from which the population should gather at specific collection points and how population flows are distributed to safe stay points, taking into account factors such as distance, travel time, facility capacity, and different emergency scenarios. This approach formalizes the two-stage evacuation process and provides an assessment of key logistical indicators of the system.

Key words: scenario approach, multi-stage logistics processes, area zoning, mathematical model, optimization, location-allocation problems, system analysis.

Коряшкіна Лариса Сергіївна – д.т.н., доцент, професор кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6423-092X>

Станіна Ольга Дмитрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6754-0317>

Koriashkina Larysa Sergiyivna – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6423-092X>

Stanina Olha Dmytrivna – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6754-0317>

Н.В. Сачанюк-Кавецька, О.І. Гетманюк, О.В. Гуда

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ВИВЧЕННІ ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ СТУДЕНТАМИ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ: ОСВІТНІЙ ЕФЕКТ

Анотація. Стаття досліджує питання ефективності застосування інструментів штучного інтелекту у забезпеченні підготовки студентів технічних спеціальностей по вищій математиці. Метою статті є дослідження та оцінка впливу ІІІ-платформ на академічну успішність, мотивацію та розвиток аналітичного мислення студентів у процесі засвоєння складних математичних концепцій. Методологія дослідження базується на порівняльному аналізі функціональних можливостей ряду ІІІ-платформ, зокрема Maple, Wolfram Alpha, Julius AI, MathGPTPro, Symbolab, Maple Calculator та GeoGebra, а також експериментальній перевірці їхньої ефективності в реальних умовах навчального процесу технічних ЗВО. Дослідження проводилося шляхом аналізу даних про академічні результати студентів та їхньої взаємодії з ІІІ-інструментами. Отримані результати свідчать, що ІІІ-платформи значно скорочують час на виконання рутинних обчислень, таких як розв'язання диференціальних рівнянь чи матричних операцій, дозволяючи студентам зосередитися на концептуальному розумінні матеріалу. Було показано, що адаптивні алгоритми ІІІ забезпечують персоналізацію навчальних траєкторій, пропонуючи завдання оптимальної складності та миттєвий зворотний зв'язок, що сприяє підвищенню мотивації та ефективності навчання. Крім того, ІІІ-системи підтримують автоматизовані докази теорем і моделювання складних систем, що сприяє формуванню дослідницьких навичок і глибшому розумінню взаємозв'язків між математичними об'єктами. Практична цінність дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності інтеграції ІІІ-технологій у навчальний процес технічних університетів, що відповідає сучасним тенденціям цифровізації освіти та сприяє підготовці кваліфікованих інженерів з розвиненими аналітичними компетентностями. Використання ІІІ-інструментів дозволяє оптимізувати викладання вищої математики, підвищуючи якість засвоєння матеріалу та ефективність педагогічної взаємодії. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою вдосконалених алгоритмів контекстного аналізу та пояснювального використання ІІІ у вищій освіті.

Ключові слова: штучний інтелект, технічні спеціальності, цифрова освіта, AI-платформи, математичне моделювання, математичний аналіз, інформаційні технології.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток цифрових технологій зумовив суттєве поширення застосування інструментів штучного інтелекту в освітній сфері, особливо у закладах вищої освіти, де постійно підвищуються вимоги до ефективності опанування складних навчальних дисциплін. Особливої гостроти це питання набуває в контексті професійної підготовки майбутніх фахівців технічного профілю, оскільки для них вища математика є не лише фундаментальною дисципліною, але й базовим засобом розвитку алгоритмічного мислення, аналітичних компетентностей та технічної інтуїції.

Інтеграція AI-технологій у процес викладання вищої математики створює принципово нові можливості для модернізації методичних підходів, реалізації індивідуалізованих освітніх стратегій та покращення академічних досягнень студентів. Впровадження AI-технологій сприяє не лише автоматизації стандартних обчислювальних процедур, але й візуалізації абстрактних математичних концепцій, деталізованому аналізу математичних конструкцій та розробці адаптивних симуляційних платформ для практичного засвоєння навчального матеріалу. З огляду на це, проблематика ефективної імплементації штучного інтелекту в процес навчання вищої математики на технічних напрямках підготовки, набуває критичної важливості в умовах цифрової модернізації вищої освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з результатами досліджень [1], [7], AI-системи демонструють аутентичну інтеграцію в освітні процеси завдяки своїм адаптивним, аналітичним та візуалізаційним характеристикам. У літературі увагу прикуто до ефективності генеративних моделей, які вміють не лише відтворювати логіку розв'язання задач, але й генерувати альтернативні варіанти завдань, що орієнтовані на розвиток аналітичних здібностей студентів [14]. Експериментальні дослідження використання AI-платформ та спеціалізованих додатків підтверджують значні переваги у створенні персоналізованих навчальних траєкторій [4], [13]. Дослідники відзначають, що штучний інтелект суттєво полегшує опанування складних розділів математичного аналізу, лінійної алгебри та геометрії завдяки можливостям візуального моделювання, детального пояснення кожного етапу розв'язання та автоматизованої верифікації результатів.

Деякі науковці [2], [8] акцентують увагу на необхідності подальшого розвитку алгоритмів інтерпретації контексту завдань та логічного супроводження процесу розв'язання, що актуалізує розвиток пояснювального штучного інтелекту в освітній галузі. На підставі аналізу можна констатувати, що AI-інструменти не лише революціонізують дидактичні методології, але й розширюють професійні можливості викладача, і підвищують результативність математичної освіти.

Мета дослідження - дослідити практичні аспекти та виявити наслідки поєднання спеціалізованих ШІ платформ з процесом вивчення вищої математики студентами які навчаються на технічних спеціальностях.

Викладення основного матеріалу дослідження. При зростанні академічного навантаження та обмеженого часу на засвоєння складних математичних понять, ШІ виступає ефективним засобом підтримки навчального процесу як з боку студентів, так і з боку викладачів. Серед підтверджених переваг застосування ШІ у викладанні та вивченні

вищої математики слід виокремити декілька найбільш значущих. По-перше, це автоматизація складних обчислень, що дає змогу суттєво зменшити навантаження на студента під час опрацювання абстрактних або багатовимірних об'єктів, зокрема у векторному аналізі, диференціальних рівняннях чи теорії функцій багатьох змінних. По-друге, адаптивне навчання, реалізоване за допомогою нейромереж, дозволяє забезпечити інтелектуальну підтримку кожного студента на його індивідуальному рівні, пропонуючи завдання оптимальної складності та надаючи миттєвий зворотний зв'язок щодо прогресу у навчанні. По-третє, сучасні AI-системи вже здатні виконувати автоматизовані докази математичних теорем, що відкриває нові горизонти для дослідницької діяльності, пришвидшує перевірку гіпотез і сприяє формуванню глибшого розуміння взаємозв'язків між математичними об'єктами (табл. 1). [9].

Таблиця 1

Переваги і ефекти від використання AI-інструментів у вивченні вищої математики

№	Перевага	Сутність	Ефект для студентів	Результат для викладачів
1	Автоматизація обчислень	Виконання складних обчислень у векторному аналізі, диференціальних рівняннях	Зменшення часу на рутинні операції, можливість зосередитися на концепціях	Звільнення часу для методологічного супроводу та пояснення складних тем
2	Адаптивне навчання	Використання нейромереж для персоналізації завдань і миттєвого зворотного зв'язку	Індивідуальний підхід, оптимальна складність завдань	Можливість відстежувати прогрес студентів і коригувати навчальний план
3	Автоматизовані докази	AI-системи здатні виконувати докази теорем і перевіряти гіпотези	Глибше розуміння математичних зв'язків, підтримка дослідницької діяльності	Прискорення перевірки студентських робіт, фокус на критичне мислення
4	Візуалізація абстрактних структур	Моделювання топології, диференціальної геометрії через графічні інтерпретації	Полегшення засвоєння складних понять, інтерактивність навчання	Використання наочних матеріалів для пояснення абстрактних тем
5	Підвищення мотивації	Гейміфікація та інтерактивні платформи на базі AI для залучення студентів	Зростання інтересу до математики, творчий підхід до розв'язання задач	Створення захоплюючого навчального середовища, полегшення взаємодії

1. Досвід застосування системи Maple у реальних умовах навчального процесу для технічних спеціальностей можемо проілюструвати через приклад підготовки студента до іспиту з дисципліни «Математичне моделювання», коли він працював над складним завданням із чисельного розв'язання нелінійної системи диференціальних

рівнянь. На пропозицію викладача студент скористався AI-платформою Maple, внаслідок чого він зміг оперативно ввести математичну модель, застосувати вбудовані алгоритми чисельного інтегрування та миттєво отримати результат [5]. Окрім числового розв'язання, програма вміє автоматично генерувати графічну візуалізацію динаміки системи у вигляді траєкторій залежно від параметрів (рис. 1.).

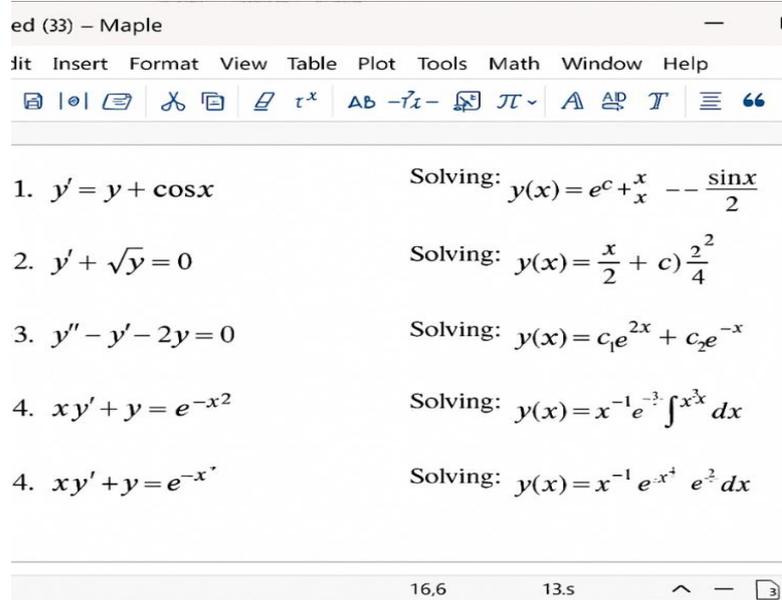


Рисунок 1 – Використання AI-платформи *Maple* для розв'язання диференціальних рівнянь

2. Іншим прикладом ефективної AI-платформи, яка активно використовується у вивченні вищої математики, є Wolfram Alpha, як потужний обчислювальний механізм для інтерактивного розв'язання широкого спектра математичних задач у реальному часі. Його функціонал включає можливість розв'язання лінійних та нелінійних рівнянь, інтегралів, диференціальних рівнянь, а також систем рівнянь, при цьому особливістю системи є демонстрація всіх проміжних етапів розв'язання, що істотно сприяє розумінню логіки побудови відповіді (рис. 2) [13, 17].

Окрім аналітичного потенціалу, *Wolfram Alpha* також пропонує потужні інструменти візуалізації математичних об'єктів, таких як функції однієї чи кількох змінних, просторові криві та поверхні, що корисно для засвоєння тем з математичного аналізу, лінійної алгебри. Платформа бере як визначені, так і невизначені інтеграли, обчислює похідні будь-якого порядку, що є надзвичайно корисним при опрацюванні тем диференціального та інтегрального числення. При цьому програма не обмежується видачею результату, а супроводжує його покроковим поясненням, сприяючи формуванню глибшого розуміння сутності математичних операцій.

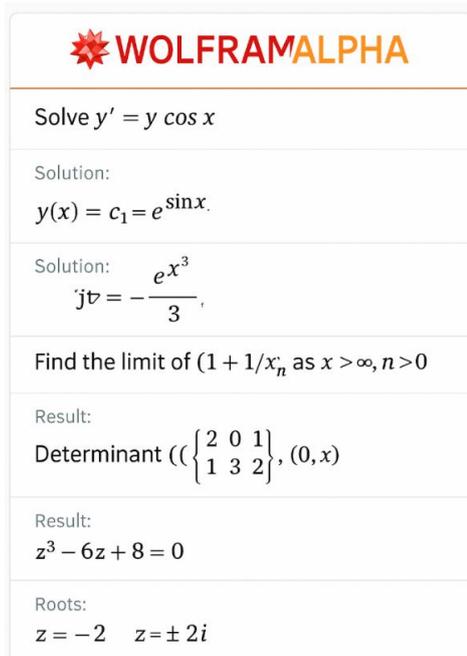


Рисунок 2 – Використання AI-платформи *Wolfram Alpha* при виконанні ряду математичних обчислень

3. Серед інструментів, що останнім часом продемонстрували високу ефективність у математичній підготовці, можна виділити платформу *Julius AI*, яка позиціонується як універсальний цифровий репетитор, що забезпечує студентів широким спектром функціональних можливостей, як від розв'язання простих алгебраїчних рівнянь до складних задач з математичного аналізу та аналітичної геометрії. Головною перевагою *Julius AI* є його здатність надавати покрокові пояснення, що дозволяє студентові не лише механічно засвоювати готові розв'язки, а й глибше проникати в суть математичних процедур, логіку доведення, алгоритмізацію та інтерпретацію результатів [14]. Крім того, цей інструмент доповнює текстову інформацію інтерактивними візуалізаціями, які дають змогу краще зрозуміти геометричний зміст математичних понять, як, наприклад поведінку функцій, розміщення точок і векторів у просторі, або графічне зображення рівнянь і нерівностей тощо (рис. 3).

У випадках, коли студенти технічних спеціальностей часто постають перед труднощами при вивченні таких тем, як диференціальне числення, кратні інтеграли, або матричний аналіз, *Julius AI* виступає якісним посередником між складною абстрактною математичною структурою та здатністю студента інтерпретувати її через конкретні обчислювальні й геометричні операції.

4. Іншим AI-інструментом є *MathGPTPro (Mathos)*, що вирізняється високим ступенем універсальності та охопленням широкого спектра математичних розділів, як від елементарної алгебри до статистики, дискретної математики та теорії чисел [8]. *MathGPTPro* здатен генерувати як розв'язки до задач, так і повноцінні пояснення, супроводжені аналітичними коментарями щодо кожного кроку обчислення або доведення (рис. 4).

AI

Problem

Find the equation of the line passing through the points (6, -1) and (1, 3).

Solution

Step 1. Determine the slope

The slope passing through two points (x_1, y_1) and (x_2, y_2) :

$$m = \frac{3 - (-1)}{1 - 6} = \frac{4}{-5}$$

Here's an interactive graph of the line passing through the points (6, -1) and (1, 3):

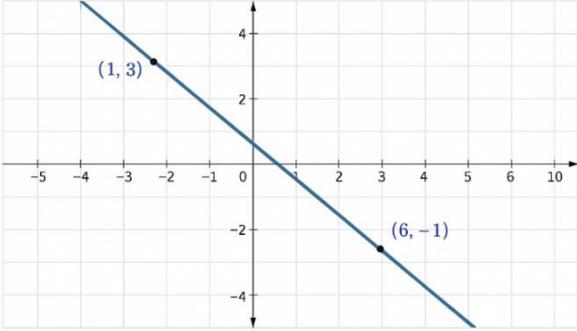


Рисунок 3 – Розв’язання задачі з аналітичної геометрії в середовищі *Julius AI*: побудова прямої через дві задані точки

Prove the angle-angle-angle AAA similarity theorem for triangles.

Solving... done!

Solution

Theorem: If in two triangles, corresponding angles are equal, then their corresponding sides are in the same ratio, and hence the triangles are similar.

Proof:

1. Let $\triangle ABC$ and $\triangle DEF$ be two triangles such that $\angle A = \angle D$, $\angle B = \angle E$, and $\angle C = \angle F$.
2. We need to prove that $\frac{AB}{DE} = \frac{BC}{EF} = \frac{AC}{DF}$.
3. Since $\angle A = \angle D$, $\angle B = \angle E$, and $\angle C = \angle F$, we have
 $\Rightarrow \angle A + \angle B + \angle C = \angle D + \angle E + \angle F$ (Angle sum property of triangles)
5. $\Rightarrow 180^\circ = 180^\circ$ (Sum of angles in a triangle is 180°)
6. Since we have obtained the result $\angle A + \angle B + \angle C = \angle D + \angle E$, so the corresponding angles are equal in both triangles. Therefore
7. $\Rightarrow \triangle ABC \sim \triangle DEF$ (AAA similarity criterion)

Рисунок 4 – Покроковий розв’язок і доведення теореми про подібність трикутників за критерієм AAA у середовищі *MathGPTPro*

У реальному навчальному процесі використання платформи MathGPTPro не лише оперативно перевіряється правильність рішень домашніх чи індивідуальних завдань, але й проводиться самооцінка та формується зворотний зв’язок щодо прогалин у знаннях. Наприклад, студент, опрацьовуючи тему статистичних розподілів або комбінато-

рики, може отримати не лише точну відповідь, але й аналіз вибору формули, розбір помилки (у разі її наявності) та рекомендації щодо альтернативного способу розв'язання.

5. Платформа *Symbolab* являє собою потужний інструмент, що спеціалізується на покроковому розв'язанні математичних задач широкого спектра складності, як від базових елементів алгебри до високорівневих обчислень математичного аналізу, диференціального числення, лінійної алгебри, статистики й комбінаторики. Основна перевага *Symbolab* полягає в тому, що система не лише обчислює кінцевий результат, а й демонструє послідовний логічний шлях до нього, надаючи студенту змогу аналізувати кожен етап розв'язання, що є критично важливим для формування глибокого розуміння алгоритмів математичного мислення, особливо в контексті самостійної роботи над задачами підвищеної складності [7] (рис. 5).

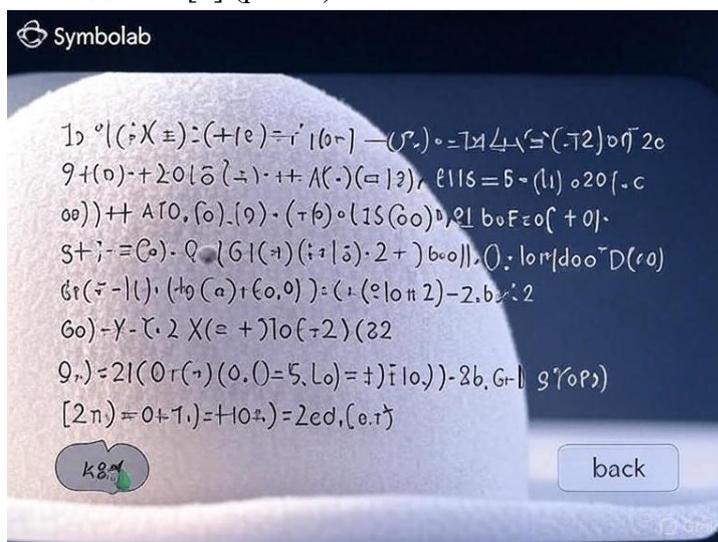


Рисунок 5 – Скріншот *Symbolab* демонструє розв'язання похідної складної функції

Інтерфейс *Symbolab* має функціонал для введення математичних виразів як вручну, так і за допомогою спеціального формульного редактора, після чого система розпізнає структуру задачі, класифікує її за типом (наприклад, розв'язання рівняння, знаходження похідної, обчислення інтеграла) та генерує покрокове пояснення із застосуванням відповідних теорем, правил і формул. При роботі зі складними логарифмічними або тригонометричними рівняннями *Symbolab* автоматично виконує перетворення, коментуючи кожну дію, що дає змогу студенту не лише повторити матеріал, а й усвідомити помилки у власних міркуваннях. Високий рівень ефективності *Symbolab* демонструє при вивченні тем математичного аналізу: похідні, границі, інтеграли та диференціальні рівняння тощо.

6. Додаток *Maple Calculator*, розроблений компанією *MapleSoft*, є мобільним інструментом, який поєднує високоточні обчислювальні можливості символьної системи *Maple* із функціональністю штучного інтелекту, що забезпечує студенту не лише швидке отримання результату, а й автоматизоване пояснення обчислювального процесу. Особливістю платформи є можливість розв'язання складних математичних задач, пов'язаних із лінійною алгеброю, чисельними методами, статистичним аналізом, системами рівнянь, оберненими матрицями, а також задачами математичного моделю-

вання. Головною перевагою *Maple Calculator* є функція розпізнавання рукописного чи друкованого математичного тексту за допомогою камери смартфона: студент має змогу просканувати приклад зі зошита, підручника або слайда та отримати не лише відповідь, а й повний аналітичний аналіз з поясненням усіх етапів (рис. 6) [6].



Рисунок 6 – *Maple Calculator* для розв’язання математичних задач з поясненнями

Додаток здатен автоматично будувати графіки як у двовимірному, так і у тривимірному просторі, що дозволяє аналізувати поведінку функцій, досліджувати критичні точки, знаходити екстремуми, визначати напрямки зростання або спадання, а також здійснювати графічну інтерпретацію систем рівнянь [10].

Особливо цінною є функціональність обробки матричних об’єктів: додаток підтримує операції над матрицями будь-якого порядку, включаючи множення, транспонування, знаходження визначника, зведення до діагонального вигляду, обчислення характеристичного полінома, що робить його незамінним у курсах з лінійної алгебри та чисельних методів [11].

7. GeoGebra – це інноваційна інтерактивна платформа, яка поєднує геометрію, алгебру, математичний аналіз і статистику в єдиному функціональному середовищі, що дозволяє не лише здійснювати розрахунки, а й будувати повноцінні математичні моделі та динамічні симуляції. Основною особливістю *GeoGebra* є можливість створення геометричних конструкцій з миттєвою реакцією на зміни параметрів, що особливо важливо при вивченні тем, пов’язаних із аналітичною геометрією, графічним поданням функцій, побудовою багатовимірних об’єктів, теорією ймовірностей і статистичним аналізом. За допомогою *GeoGebra* студент може вільно будувати графіки функцій з можливістю анімації, що дає змогу динамічно досліджувати вплив зміни параметрів на вигляд функції. Наприклад, змінюючи коефіцієнти квадратичної функції, студент у реальному часі спостерігає, як парабола змінює свою орієнтацію, положення вершини та напрям гілок. Унікальність *GeoGebra* полягає в наявності 3D-модуля для побудови поверхонь, об’ємних тіл, просторових векторів та перетинів, що потрібно при опануванні

тем стереометрії, багатовимірного аналізу, теорії поля та диференціальної геометрії (рис. 7).

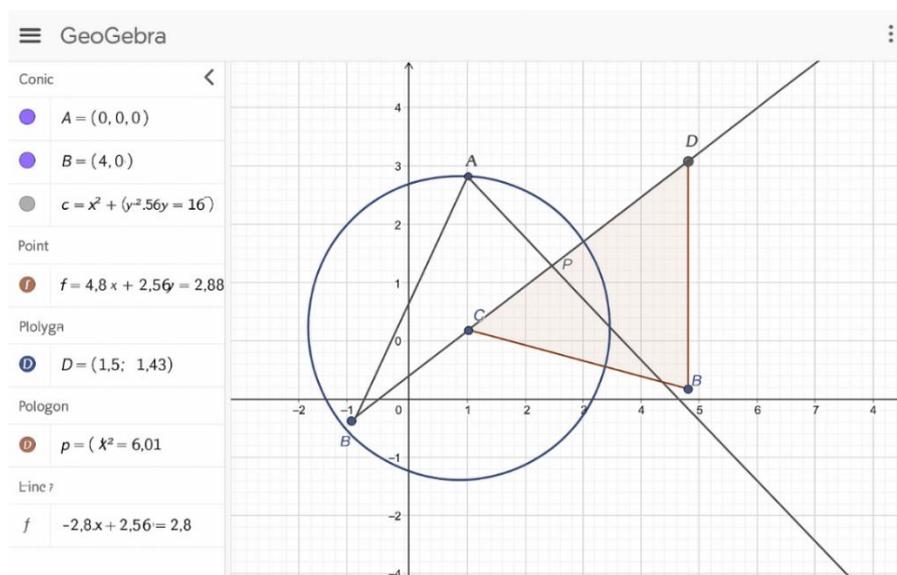


Рисунок 7 – Побудова геометричних конструкцій у середовищі *GeoGebra* геометричних фігур: коло, трикутники, пряма та полігон з координатами точок

GeoGebra також підтримує платформу CAS (Computer Algebra System), яка вмiє робити символічні обчислення: розв'язання рівнянь і нерівностей, обчислення інтегралів, диференціювання, скорочення виразів, розкладання на множники, що робить платформу ефективним середовищем для вивчення аналітичного аспекту математики. Крім того, *GeoGebra* формує реальну можливість використовувати статистичні функції та можливу побудову гістограм, діаграм розсіювання, розрахунок середніх, дисперсій, кореляцій та регресій, що поєднує математичний аналіз з обробкою емпіричних даних [11] (табл. 2).

Штучний інтелект, завдяки своїм унікальним можливостям, кардинально трансформує процес вивчення вищої математики студентами технічних спеціальностей, забезпечує високий запас адаптивності, інтерактивності та підняття продуктивності освітнього процесу, що як полегшує так і пришвидшує засвоєння складних математичних концепцій, але й сприяє розвитку аналітичних навичок, необхідних для вирішення інженерних та інформаційних задач [3].

Висновки. За підсумками проведеного дослідження встановлено, що застосування технологій штучного інтелекту в процесі вивчення курсу вищої математики студентами технічних спеціальностей значно змінює характер навчального процесу. Ці результати досягаються через реалізацію принципів адаптивного, інтерактивного та персоналізованого навчання, що дає можливість більш ефективно засвоювати складний навчальний матеріал. Крім того, автоматизація рутинних обчислень та перевірки результатів суттєво зменшує когнітивне навантаження на студента.

Аналіз показав, що сучасні AI-інструменти, такі як: *Maple*, *Wolfram Alpha*, *Julius AI*, *MathGPTPro*, *Symbolab*, *Maple Calculator* та *GeoGebra* мають широкий функціонал і

потужні засоби візуалізації. Ці особливості роблять їх не лише корисними для самостійного вивчення тем, але й цінним доповненням до традиційних методів викладання. Вивчено практичні переваги інтеграції штучного інтелекту в математичну освіту. Зокрема, вони забезпечують детальні пояснення при розв'язанні задач, побудову тривимірних графіків і динамічних моделей, сприяють зрозумінню абстрактних понять, а також дають змогу створювати симуляції й адаптивні завдання і все це суттєво поглиблює можливості вивчення вищої математики.

Досліджено вплив таких платформ на рівень знань студентів. Виявлено, що інструменти на основі штучного інтелекту активізують розуміння математичних концепцій, сприяють розвитку аналітичного мислення та формують дослідницький підхід у навчанні, що є важливим елементом професійної підготовки майбутніх інженерів. Обґрунтовано доцільність впровадження AI-технологій у навчальний процес технічних університетів, оскільки це відповідає сучасним тенденціям цифровізації освіти. Такий підхід забезпечує точність розрахунків, підтримує міждисциплінарні зв'язки та підвищує ефективність вирішення комплексних інженерних завдань.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика AI-платформ і додатків для вивчення вищої математики студентами технічних спеціальностей

Платформа/ Додаток	Покрокові пояснення	Візуалізація	Інтерактивність	Адаптивність
1. Maple	Так, детальні покрокові рішення для диференціальних рівнянь	Так, графіки траєкторій залежно від параметрів	Так, динамічна зміна параметрів	Так, адаптація до складних обчислень
2. Wolfram Alpha	Так, демонстрація всіх етапів розв'язання	Так, графіки функцій, просторових кривих	Так, реальне налаштування параметрів	Так, підтримує різні типи задач
3. Julius AI	Так, детальні пояснення з логікою	Так, інтерактивні графіки геометричних об'єктів	Так, динамічне моделювання	Так, адаптація до рівня студента
4. MathGPTPro	Так, з аналітичними коментарями	Так, графіки для доведень	Так, інтерактивні симуляції	Так, індивідуальний зворотний зв'язок
5. Symbolab	Так, послідовний логічний шлях	Так, графіки похідних і функцій	Так, інтерактивні зміни параметрів	Так, підтримка складних обчислень
6. Maple Calculator	Так, автоматизоване пояснення	Так, 2D/3D графіки, критичні точки	Так, реальна зміна параметрів	Так, розпізнавання тексту та адаптація
7. GeoGebra	Так, символічні обчислення	Так, 3D поверхні, анімація графіків	Так, динамічні конструкції	Так, підтримка статистики та аналізу

ЛІТЕРАТУРА

1. Геревенко А. М., Ільїна Т. В., Ібрагімова Л. А. Використання цифрових платформ для підвищення якості професійної освіти. Академічні візії. 2024. № 31. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442893>
2. Клеопа І. А., Тютюнник О. І., Крупський Я. В., Добранюк Ю. В. Особливості використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій у вищій математичній освіті. Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems. 2024. № 72. С. 113-124. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2024-72-113-124>
3. Македон В. В., Ільченко Н. О. Кон'юнктура світового ринку ІТ-послуг в умовах економіки 4.0. Ефективна економіка. 2021. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8525>. DOI: 10.32702/2307-2105-2021.1.8
4. Мар'єнко М., Коваленко В. Штучний інтелект та відкрита наука в освіті. Фізико-математична освіта. 2023. Том 38. № 1. С. 48-53. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-1-007.
5. Потапова О. М., Олексенко В. М., Петрина Я. Д. Сучасні підходи до викладання математичних дисциплін у вищій школі. Інноваційна педагогіка. 2025. Вип. 79, Т. 2. с. 154–160. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/79.2.30>
6. Awang L. A., Yusop F. D., Danaee M. Current practices and future direction of artificial intelligence in mathematics education: A systematic review. International Electronic Journal of Mathematics Education. 2025. Vol. 20. no. 2. Article em0823. <https://doi.org/10.29333/iejme/16006>
7. Bobro N. The use of artificial intelligence in the organization of the educational process in a digital educational environment. Social Science and Humanities Journal. 2024. № 08 (02). p. 34586-34589. DOI: 10.18535/sshj.v8i03.945.
8. Chaka C. Fourth industrial revolution – a review of applications, prospects, and challenges for artificial intelligence, robotics and blockchain in higher education. Research and Practice in Technology Enhanced Learning (RPTTEL). 2023. 18(2). URL: <http://rptel.apsce.net/index.php/RPTTEL/article/view/2023-18002>.
9. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
10. Makedon V., Korneyev M. Improving methodology of estimating value of financial sector entities dealing in mergers and acquisitions. Investment Management and Financial Innovations. 2014. No 11(1). p. 44-55. URL: https://www.businessperspectives.org/images/pdf/applications/publishing/templates/article/assets/5607/imfi_en_2014_01_Makedon.pdf
11. Mredula K. P., Roman J., Sajja P. S. AI-Based Tools in Mathematics Education: A Systematic Review of Characteristics, Applications, and Evaluation Methods. International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH). 2024. Vol. 2. no. 07. P. 1958–1967. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0268>

12. Sikora Ya., Skorobahatska O., Lykhodieieva H., Maksymenko A., Tsekhmister Y. Informatization and digitization of the educational process in higher education: main directions, challenges of the time. *Revista Eduweb*. 2023. Vol. 17. no2. pp. 244-256. DOI: <https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2023.17.02.21>.
13. Tang W. K. Artificial Intelligence in Mathematics Education: Trends, Challenges, and Opportunities. *International Journal of Research in Mathematics Education*. 2025. Vol. 3, no. 1. p. 75–90. <https://doi.org/10.24090/ijrme.v3i1.13496>
14. Yavich R. Improving learning outcomes in advanced mathematics for underprepared university students through AI-driven educational tools. *African Educational Research Journal*. 2025. Vol. 13, no. 2. p. 224–239. URL: <https://www.netjournals.org/pdf/AERJ/2025/2/25-022.pdf>
15. Zhyvko Z., Petrukha N. Formation and development of digital competencies in the conditions of digitalization of society. *The Development of Innovations and Financial Technology in the Digital Economy: Monograph*. OÜ Scientific Center of Innovative Research. 2023. P. 62-85. DOI: 10.36690/DIFTDE-2023-62-85.

REFERENCES

1. Herevenko, A. M., Iliina, T. V., & Ibrahimova, L. A. (2024). Vykorystannia tsyfrovyykh platform dlia pidvyshchennia yakosti profesiinoi osvity [The use of digital platforms for improving the quality of vocational education]. *Akademichni vizii – Academic Visions*, (31). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11442893>
2. Kleopa, I. A., Tiutiunnyk, O. I., Krupskiy, Ya. V., & Dobraniuk, Yu. V. (2024). Osoblyvosti vykorystannia suchasnykh informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii u vyshchii matematychnii osviti [Peculiarities of using modern ICT in higher mathematical education]. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training Methodology Theory Experience Problems*, (72), 113–124. <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2024-72-113-124>
3. Makedon, V. V., & Ilchenko, N. O. (2021). Kon’iunktura svitovoho rynku IT-posluzh v umovakh ekonomiky 4.0 [The global IT services market in the economy 4.0 context]. *Efektivna ekonomika – Effective Economy*, (1). <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8525>. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.1.8>
4. Marienko, M., & Kovalenko, V. (2023). Shtuchnyi intelekt ta vidkryta nauka v osviti [Artificial intelligence and open science in education]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 38(1), 48–53. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-1-007>
5. Potapova, O. M., Oleksenko, V. M., & Petryna, Ya. D. (2025). Suchasni pidkhody do vykladannia matematychnykh dystsyplin u vyshchii shkoli [Modern approaches to teaching mathematical disciplines in higher education]. *Inovatsiina pedahohika – Innovative Pedagogy*, (79, vol. 2), 154–160. <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2025/79.2.30>
6. Awang, L. A., Yusop, F. D., & Danaee, M. (2025). Current practices and future direction of artificial intelligence in mathematics education: A systematic review. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 20(2), Article em0823. <https://doi.org/10.29333/iejme/16006>
7. Bobro, N. (2024). The use of artificial intelligence in the organization of the educational

process in a digital educational environment. *Social Science and Humanities Journal*, 8(2), 34586–34589. <https://doi.org/10.18535/sshj.v8i03.945>

8. Chaka, C. (2023). Fourth industrial revolution – a review of applications, prospects, and challenges for artificial intelligence, robotics and blockchain in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning (RPTEL)*, 18(2). <http://rptel.apsce.net/index.php/RPTEL/article/view/2023-18002>

9. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

10. Makedon, V., & Korneyev, M. (2014). Improving methodology of estimating value of financial sector entities dealing in mergers and acquisitions. *Investment Management and Financial Innovations*, 11(1), 44–55.

https://www.businessperspectives.org/images/pdf/applications/publishing/templates/article/assets/5607/imfi_en_2014_01_Makedon.pdf

11. Mredula, K. P., Roman, J., & Sajja, P. S. (2024). AI-Based Tools in Mathematics Education: A Systematic Review of Characteristics, Applications, and Evaluation Methods. *International Research Journal on Advanced Engineering Hub (IRJAEH)*, 2(7), 1958–1967. <https://doi.org/10.47392/IRJAEH.2024.0268>

12. Sikora, Ya., Skorobahatska, O., Lykhodieieva, H., Maksymenko, A., & Tsekhmister, Y. (2023). Informatization and digitization of the educational process in higher education: main directions, challenges of the time. *Revista Eduweb*, 17(2), 244–256. <https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2023.17.02.21>

13. Tang, W. K. (2025). Artificial Intelligence in Mathematics Education: Trends, Challenges, and Opportunities. *International Journal of Research in Mathematics Education*, 3(1), 75–90. <https://doi.org/10.24090/ijrme.v3i1.13496>

14. Yavich, R. (2025). Improving learning outcomes in advanced mathematics for underprepared university students through AI driven educational tools. *African Educational Research Journal*, 13(2), 224–239. <https://www.netjournals.org/pdf/AERJ/2025/2/25-022.pdf>

15. Zhyvko, Z., & Petrukha, N. (2023). Formation and development of digital competencies in the conditions of digitalization of society. In *The Development of Innovations and Financial Technology in the Digital Economy: Monograph* (pp. 62–85). Oŭ Scientific Center of Innovative Research. <https://doi.org/10.36690/DIFTDE-2023-62-85>

Received 23.01.2026.

Accepted 26.01.2026.

***Using artificial intelligence in the study of higher mathematics by students
of technical specialties: educational effect***

This article explores the effectiveness of using artificial intelligence (AI) tools in supporting the training of technical students in higher mathematics. The aim of the article is to investigate and assess the impact of AI platforms on students' academic performance, motivation, and development of analytical thinking in the process of mastering complex mathematical concepts. The research methodology is based on a comparative analysis of the functional capabilities of several AI platforms, including Maple, Wolfram Alpha, Julius AI,

MathGPTPro, Symbolab, Maple Calculator, and GeoGebra, along with experimental evaluation of their effectiveness in real educational settings within technical universities.

The study was conducted through an analysis of students' academic results and their interactions with AI tools. The findings show that AI platforms significantly reduce the time required for routine calculations - such as solving differential equations or performing matrix operations - allowing students to focus on conceptual understanding. It was demonstrated that adaptive AI algorithms provide personalized learning paths by offering optimally challenging tasks and instant feedback, which enhances both motivation and learning efficiency. Moreover, AI systems support automated theorem proving and modeling of complex systems, which fosters research skills and a deeper understanding of the interconnections between mathematical objects.

The practical value of this study lies in justifying the integration of AI technologies into the educational process of technical universities, aligning with modern trends of educational digitalization and contributing to the preparation of qualified engineers with strong analytical competencies. The use of AI tools allows for the optimization of higher mathematics instruction, improving both the quality of knowledge acquisition and the effectiveness of pedagogical interaction. Future research prospects include the development of advanced algorithms for contextual analysis and explainable AI implementation in higher education.

Keywords: artificial intelligence, technical specialties, digital education, AI platforms, mathematical modeling, mathematical analysis, information technologies.

Сачанюк-Кавецька Наталія Василівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики, Вінницький національний технічний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6405-1331>

Гетманюк Оксана Іванівна - асистент кафедри математики та методики її навчання, Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5552-5516>

Гуда Оксана Вікторівна –к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики, Луцький національний технічний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3602-7892>

Sachaniuk-Kavets`ka Natalia - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Vinnytsia National Technical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6405-1331>

Hetmaniuk Oksana - Assistant at the Department of Mathematics and Methods of its Teaching, Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5552-5516>

Huda Oksana - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Higher Mathematics, Lutsk National Technical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3602-7892>

ПРОЄКТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ АРХІТЕКТУРИ RFID-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕДИЧНОЇ СИСТЕМИ

Анотація. У сучасних медичних установах зростає потреба в ефективному управлінні медичними даними та автоматизації рутинних процесів. У численних дослідженнях останніх років доведено ефективність RFID-технологій для відстеження пацієнтів, медичного обладнання та лікарських засобів, однак недостатньо уваги приділяється питанням інтеграції з існуючими інформаційними системами, безпеки даних і вибору оптимальної архітектури. Метою роботи є проєктування ефективної клієнт-серверної RFID-орієнтованої медичної системи, що забезпечує високу надійність, масштабованість та захищеність даних. У статті проаналізовано варіанти архітектур (простих, багаторівневих, мікросервісних, P2P), розроблено власну модель з централізованим управлінням на базі реляційної СУБД та API для взаємодії з веб- і мобільними клієнтами. Обґрунтовано вибір саме клієнт-серверної моделі, наведено структуру бази даних, схему взаємодії компонентів та порівняльну таблицю ефективності. У підсумку підтверджено доцільність інтеграції RFID у медичні системи для підвищення точності, зниження адміністративного навантаження та поліпшення якості обслуговування.

Ключові терміни: RFID-технології, медичні інформаційні системи, реляційні бази даних, клієнт-серверна архітектура, автоматизація, медичні записи, ідентифікація пацієнтів, захист даних.

Постановка проблеми. Сучасні медичні установи стикаються з численними викликами в управлінні даними пацієнтів. Традиційні методи ведення документації часто є неефективними та можуть призводити до помилок, що впливають на якість обслуговування пацієнтів. Зокрема, велика кількість паперових записів може ускладнити швидкий доступ до необхідної інформації, що, у свою чергу, може затримати надання медичної допомоги. Іншим викликом є забезпечення точності даних та уникнення їх втрати, що є критичним для забезпечення безпеки пацієнтів.

RFID-технології (Radio Frequency Identification) представляють собою інноваційне рішення для автоматизації процесів управління медичною інформацією. Вони використовують радіохвилі для автоматичної ідентифікації та відстеження об'єктів, що дозволяє значно спростити процеси збору та обробки даних. Основні компоненти системи RFID включають зчитувачі, антени та RFID-мітки, які містять унікальний ідентифікаційний номер. Ці компоненти працюють разом для збирання даних та передачі їх

до центральної системи управління, що дозволяє автоматизувати багато рутинних процесів та зменшити ризик людських помилок [1].

Впровадження RFID-технологій у медичних установах має потенціал значно покращити координацію між різними відділеннями, забезпечуючи лікарям швидкий доступ до важливої інформації. Це може не тільки підвищити ефективність роботи медичного персоналу, але й покращити якість обслуговування пацієнтів, зменшуючи час очікування та підвищуючи точність діагностичних та лікувальних процедур [2].

RFID (Radio Frequency Identification) – це технологія автоматичної ідентифікації, яка використовує радіохвилі для зчитування та запису даних з міток, прикріплених до об'єктів. Система RFID складається з трьох основних компонентів: RFID-мітки, зчитувачів та центральної системи управління даними [3]. RFID-мітки можуть бути активними, пасивними або напівпасивними, залежно від способу живлення та передачі даних [4].

Як працює RFID:

- RFID-мітка – містить мікročип та антену, які дозволяють зберігати та передавати дані. Пасивні мітки активуються полем зчитувача, тоді як активні мають власне джерело живлення;

- зчитувач – випромінює радіохвилі для активації міток та зчитування їх даних;

- центральна система – отримує дані від зчитувачів, обробляє їх та інтегрує у відповідні інформаційні системи [5].

RFID-технології широко використовуються у різних галузях, включаючи охорону здоров'я, логістику, ритейл та виробництво, завдяки їх здатності автоматизувати процеси та зменшити ризик помилок [6].

Технологія радіочастотної ідентифікації (RFID) робить революцію в галузі медицини, покращуючи догляд за пацієнтами та ефективність роботи. Застосування RFID в охороні здоров'я включають відстеження пацієнтів, керування ліками та контроль запасів, що разом покращує результати медичної допомоги та зменшує витрати. Наприклад, дозатори ліків із підтримкою RFID нагадують пацієнтам про необхідність прийняти ліки вчасно, що суттєво сприяє дотриманню режиму. Крім того, системи RFID полегшують відстеження медичних пристроїв, забезпечуючи їх доступність і зменшуючи втрати. Крім того, торговельні автомати RFID забезпечують легкий доступ до ліків, спрощуючи процес видачі. Загалом, інтеграція технології RFID в охорону здоров'я не тільки оптимізує управління ресурсами, але й покращує безпеку пацієнтів і покращує досвід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поточний стан використання RFID-технологій у медичних установах висвітлює значні можливості для покращення управління медичними даними та операційними процесами. Різні дослідження підтверджують ефективність RFID у логістиці, моніторингу активів та керуванні інформацією пацієнтів.

Дослідження Fry і Lenert [7] демонструє, як RFID може покращити реакцію лікарень на масові нещасні випадки через ефективне відстеження пацієнтів, персоналу та

обладнання. Це важливо для оптимізації ресурсів та забезпечення швидкої допомоги в критичних ситуаціях.

Також Nakim і співавтори [8] розглядають пасивну RFID систему для моніторингу медичних активів, що дозволяє зменшити втрати та підвищити ефективність використання обладнання у лікарнях. Це допомагає оптимізувати внутрішні логістичні операції та забезпечує більшу доступність критично необхідних медичних інструментів.

Водночас, Kumar, Swanson, і Tran [9] аналізують застосування RFID у ланцюжках постачання медичної сфери, показуючи, як ця технологія може покращити ефективність та вартісну ефективність в обробці медичних товарів та засобів.

Дослідження Gómez [10] включає інтеграцію RFID з Wi-Fi для відстеження місцезнаходження біомедичного обладнання в реальному часі, що допомагає запобігти втраті та забезпечує своєчасне технічне обслуговування.

Інша значна робота під авторством Vochem [11] представляє додаток для смартфонів, який дозволяє медичним працівникам відстежувати медичні пристрої, резервувати обладнання та ефективно керувати логістикою.

Крім того, Alan D. Smith [12] підкреслюють операційні переваги RFID в охороні здоров'я, наголошуючи на зниженні витрат і підвищенні цінності для пацієнтів завдяки кращому управлінню запасами.

Дослідження систем управління ліками в державних лікарнях під авторством Katherine Vaicker [13] ілюструє, як RFID може пом'якшити такі проблеми, як крадіжка ліків, і покращити відстеження.

Ці дослідження вказують на важливість подальшого розвитку та вдосконалення RFID-технологій у медичній сфері, особливо у контексті підвищення точності, безпеки та ефективності медичного обслуговування.

Після розгляду робіт авторів можна зазначити, що, хоча дослідження демонструють численні переваги RFID-технологій у медичних установах, вони мають кілька недоліків. По-перше, більшість досліджень зосереджені на впровадженні RFID в окремих аспектах, таких як логістика або відстеження активів, проте немає достатньої уваги до комплексної інтеграції RFID із наявними медичними інформаційними системами. Також часто бракує аналізу витрат на впровадження та довгострокових фінансових результатів. Крім того, недостатньо вивчено питання конфіденційності даних і захисту пацієнтів, які є критичними у медичному середовищі. Для подальшого розвитку важливо враховувати ці аспекти та удосконалювати механізми захисту даних, а також робити акцент на масштабованості систем.

Мета роботи полягає в створенні системи ідентифікації пацієнтів за допомогою RFID, яка буде мати достатньо високий рівень захищеності і надійності.

Викладення основного матеріалу дослідження. Дослідження і розробка архітектури системи. Варіативність архітектур RFID-орієнтованих систем є ключовим аспектом при їхньому проектуванні та реалізації в різноманітних сферах застосування, зокрема у медицині. Архітектура RFID-систем може варіюватися від простих локальних конфігурацій до складних мультирівневих інтегрованих мереж, що включають ши-

рокий спектр пристроїв та інтерфейсів для обміну даними. Вибір архітектури залежить від специфічних потреб закладу та обсягу даних, що потрібно обробляти.

На простому рівні RFID-система може складатися з RFID-міток, читачів і базової бази даних (рис. 1) [14].

Для більш складних медичних установ використовуються розгалужені системи (рис. 2), які інтегрують централізоване зберігання даних, передові алгоритми обробки даних та високий рівень інтеграції з іншими медичними інформаційними системами [15].

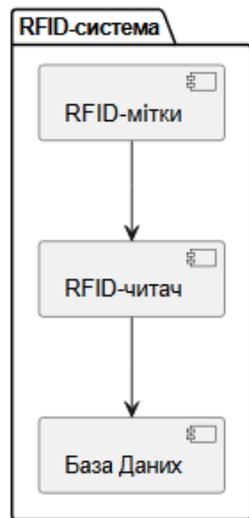


Рисунок 1 – Базова архітектура RFID-орієнтованих систем

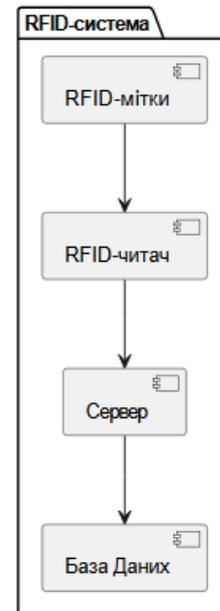


Рисунок 2 – Базова багаторівнева архітектура RFID-орієнтованих систем

Це дозволяє забезпечити комплексне управління інформацією та взаємодію з усіма відділеннями лікарні [16].

Вибір архітектури для медичної інформаційної системи на базі RFID залежить від багатьох факторів, включаючи специфіку операційних процесів установи, потреби в безпеці та конфіденційності даних, а також масштаби інтеграції з іншими системами. Клієнт-серверна архітектура є одним з найефективніших підходів до реалізації таких систем через її гнучкість, масштабованість та здатність до інтеграції різних видів клієнтських пристроїв.

Клієнт-серверна модель передбачає централізацію обробки даних на сервері, що забезпечує надійне управління ресурсами та централізовану безпеку. Клієнти (як веб-браузери, так і мобільні застосунки) взаємодіють із сервером через добре визначений API, що дозволяє легко додавати нові функції та покращувати існуючі компоненти без змін в інших частинах системи [17].

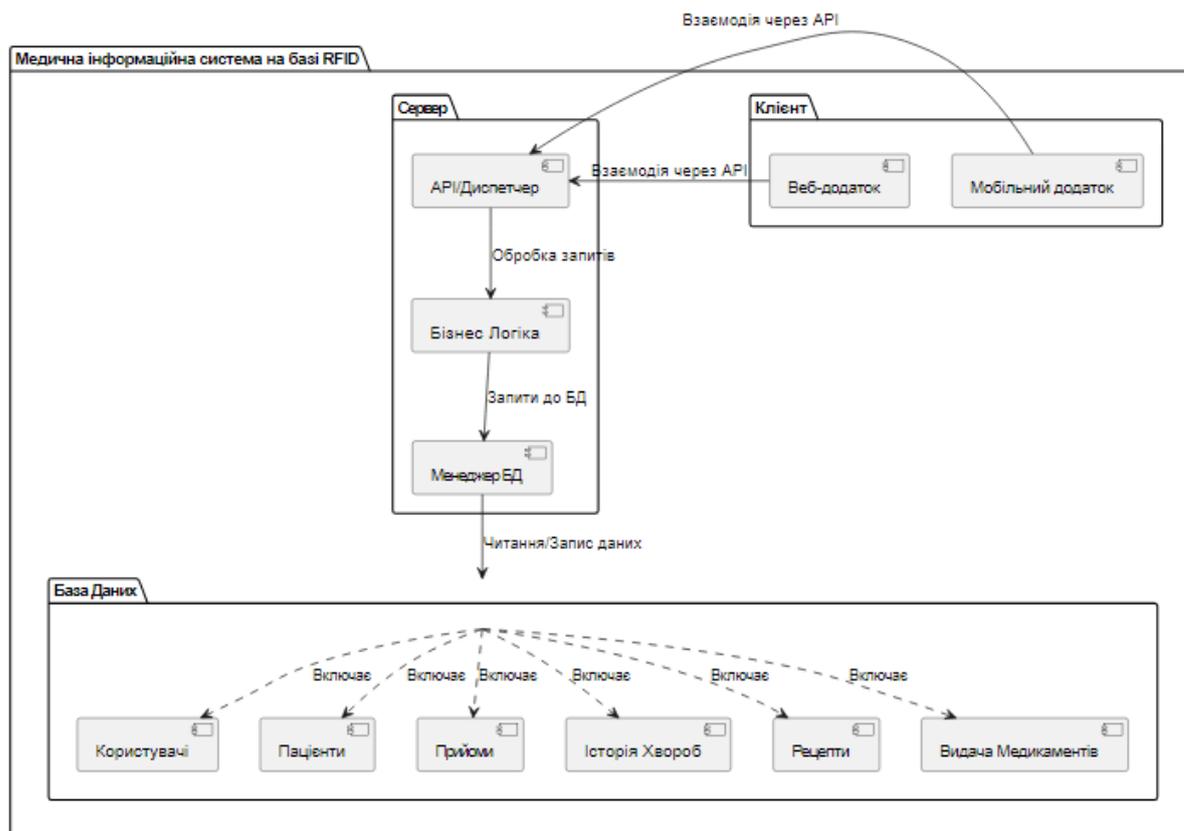


Рисунок 3 – Архітектура системи

На рис. 3 представлено архітектуру, яка втілює ці принципи. Сервер виконує ключові функції, такі як обробка запитів, управління сеансами та інтеграція баз даних, що забезпечує обробку великих обсягів даних ефективно та безпечно. Клієнтські застосунки можуть взаємодіяти з сервером через безпечний API для виконання запитів, що стосуються медичних записів, обладнання чи інформації про пацієнтів [18].

Архітектура також підтримує розгалужену структуру обміну даними з зовнішніми системами та інтеграцію з іншими медичними інформаційними системами, що забезпечує гнучкість у процесі забезпечення медичних послуг. Централізоване зберігання даних та їх централізована обробка на сервері дозволяють виконувати комплексний аналіз та генерацію звітів, підвищуючи якість медичного обслуговування.

Під час розробки медичної інформаційної системи на базі RFID було розглянуто декілька альтернативних архітектур, які мали свої недоліки та обмеження.

Одним з розглянутих варіантів була розподілена архітектура, зокрема модель Peer-to-Peer (P2P), яка дозволяє безпосереднє з'єднання між клієнтськими пристроями без використання централізованого сервера. Ця модель має переваги у високій масштабованості та витривалості системи. Проте, вона виявилася неефективною для управління великими обсягами чутливих медичних даних, оскільки створює складнощі з контролем доступу та забезпеченням безпеки даних, що є критично важливим для медичної сфери.

Іншим варіантом була мікросервісна архітектура [19]., яка дозволяє розділити систему на менші, незалежні компоненти. Такий підхід сприяє спрощенню розробки та тестування, забезпечуючи високу гнучкість системи. Однак, керування численними мікросервісами та забезпечення їх взаємодії утворює складність, яка може призвести до затримок у відгуку системи та збільшити складність інтеграції з іншими медичними системами. Для аналізу актуальності розробленої архітектури слід порівняти її з класичними.

Таблиця 1

Порівняння архітектур

Параметр	Проста RFID-система	Багаторівнева RFID-система	Власна архітектура
Структура	Локальна, з базовою базою даних	Багаторівнева, з сервером та клієнтами	Клієнт-серверна з багатим функціоналом
Компоненти	RFID-мітки, RFID-читач, база даних	RFID-мітки, RFID-читач, сервер, база даних, веб/мобільні клієнти	RFID-мітки, сервер, клієнт, мобільний і веб-додатки, менеджер БД, обробка запитів
Підтримка додатків	Немає	Веб-додатки	Інтегровані веб- та мобільні додатки
Обробка даних	Базова	Серверна обробка запитів	Серверна обробка з бізнес-логікою та менеджером БД
Масштабованість	Низька	Середня	Висока
Безпека даних	Мінімальна	Середня	Висока (з використанням менеджера БД та захищених запитів)
Гнучкість інтеграції	Низька	Середня	Висока (з можливістю додавання нових компонентів)
Автоматизація процесів	Обмежена	Середня	Висока (інтегрована бізнес-логіка)
Керування медичними даними	Обмежене	Середнє	Деталізоване, з підтримкою пацієнтів, лікарських призначень та історії хвороб
Відповідність сучасним вимогам	Низька	Середня	Висока (адаптована для медичних установ з високими вимогами до безпеки та точності даних)

Централізована, клієнт-серверна архітектура була обрана як найбільш відповідна, оскільки вона забезпечує ефективне управління даними, високий рівень безпеки, зручність у підтримці та можливість масштабування, важливі для медичних установ.

Зберігання даних в RFID-орієнтованій медичній системі. У RFID-орієнтованій медичній системі ключовим аспектом є ефективне зберігання та управління даними, що забезпечується за допомогою спеціалізованої бази даних. Структура такої бази, представлена на рис. 4, включає різні таблиці, кожна з яких відповідає за окремі аспекти медичної інформації.

Таблиця Users фіксує інформацію про користувачів системи, зокрема їхні імена, паролі та ролі, що дозволяє імплементувати механізми контролю доступу та забезпечення безпеки даних. Таблиця Patients містить деталі про пацієнтів, включно з їх іменами, датами народження та контактною інформацією, забезпечуючи централізоване зберігання критично важливих медичних даних.

Архітектура бази також включає таблиці, що зберігають інформацію про призначення та рецепти, які взаємопов'язані з даними про пацієнтів та лікарів, що забезпечує інтеграцію і управління медичними записами. Наприклад, таблиця MedicalHistory фіксує історію хвороби, що включає всі медичні записи та результати обстежень, створюючи детальну картину медичного профілю пацієнта.

Ця модульна архітектура бази даних забезпечує велику варіативність у реалізації медичних інформаційних систем, дозволяючи легко адаптувати систему до змінюваних потреб медичної установи. Кожен модуль може бути оптимізований або модифікований незалежно, що сприяє гнучкості та масштабованості системи, дозволяючи впроваджувати нові технологічні рішення без необхідності перебудови всієї системи.

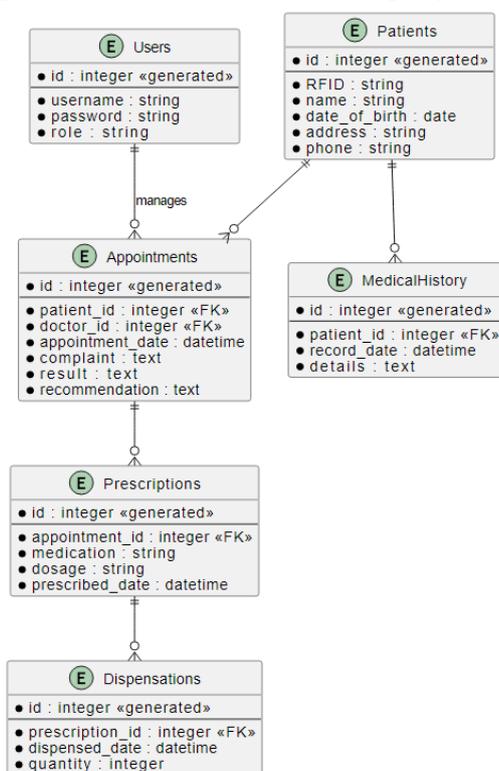


Рисунок 4 – Схема бази даних системи

Під час проектування RFID-орієнтованої медичної інформаційної системи було розглянуто декілька альтернативних підходів до структури зберігання даних, кожен з яких мав свої переваги, але також і значні недоліки, які унеможливили їх використання.

Перший варіант включав використання децентралізованої бази даних, де кожен медичний пристрій чи вузол мав власну невелику базу даних. Цей підхід забезпечував високий рівень автономії та міг зменшити навантаження на центральну систему. Проте, децентралізація ускладнила б синхронізацію даних між різними вузлами та могла призвести до проблем із консистенцією інформації [20].

Інший розглянутий варіант передбачав використання NoSQL баз даних для гнучкого управління неструктурованими медичними даними. Такий підхід дозволяє ефективніше обробляти великі масиви даних та надає кращу масштабованість. Однак, NoSQL системи мають обмеження щодо транзакційної цілісності та менш строгі гарантії щодо консистенції даних, що є критичним для медичних додатків, де точність та надійність даних мають вирішальне значення [21].

Також було розглянуто інтегровані платформи, які об'єднують зберігання даних з аналітичними інструментами. Цей варіант міг забезпечити потужні аналітичні можливості всередині самої бази даних, але він потребував значно вищих початкових інвестицій та складнішої підтримки.

З урахуванням згаданих недоліків, було вирішено обрати клієнт-серверну архітектуру з реляційною базою даних, яка надає строгі гарантії щодо цілісності, консистенції та безпеки даних. Цей підхід дозволяє забезпечити централізоване управління медичними даними, легкість доступу до історії пацієнта та високий рівень інтеграції з іншими медичними системами.

Висновки. Вивчення та впровадження RFID-технологій у медичних установах виявило значний потенціал для покращення управління медичними даними. У ході дослідження було розглянуто різноманітні архітектурні рішення та бази даних, що призвело до розробки фінальних версій архітектур та баз даних, оптимізованих для використання у медичних інформаційних системах. Застосування RFID не лише сприяло підвищенню точності та швидкості обробки інформації пацієнтів, але й значно знизило адміністративне навантаження на медичний персонал через автоматизацію процесів управління лікарськими засобами та планування прийомів. Такі розробки відкривають нові можливості для подальших досліджень та розвитку в цій критично важливій області.

ЛІТЕРАТУРА

1. Radio Frequency Identification (RFID) in health care: where are we? A scoping review // *Health and Technology*. – 2023.
2. The Adoption and Implementation of RFID Technologies in Healthcare: A Literature Review // *Journal of Medical Systems*. – 2023.
3. The Benefits and Barriers to RFID Technology in Healthcare // *HIMSS*. – 2023.
4. Бендавід Я., Бек Г. RFID в охороні здоров'я: концептуальна основа використання та можливостей // *Journal of Medical Systems*. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 397–405.
5. Охасі К., Ота С., Оно-Мачадо Л. та ін. Підвищення безпеки пацієнтів за допомогою технології RFID // *Healthcare Informatics*. – 2010. – Т. 27, № 6. – С. 45–52.

6. Перес М., Томпсон Д., Лі Х. Вплив технології RFID на відстеження пацієнтів та видачу медикаментів // *Journal of Healthcare Management*. – 2012. – Т.57, №4. – С.123–135.
7. Фрай Е., Ленерт Л. Відстеження пацієнтів, персоналу та обладнання за допомогою RFID для підвищення ефективності реагування лікарень у надзвичайних ситуаціях // *Матеріали симпозиуму АМІА*. – [Місце вид. невідоме], [рік невідомий].
8. Хакім Г., Рено Р., Ендерле Д. Пасивна RFID-система моніторингу активів у лікарняному середовищі // *IEEE 32-а щорічна конференція з біоінженерії Північно-Східного регіону США*. – 2006.
9. Кумар С., Свансон Е., Чан Т. Застосування RFID у ланцюгах постачання в охороні здоров'я // *International Journal of Health Care Quality Assurance*. – 2009. – №22. – С.67–81.
10. Гомес С., Суарес Е. Система RFID + Wi-Fi для контролю розташування біомедичного обладнання у лікарнях з інтелектуальним інвентарем // *SpringerLink*.
11. Бохем А., Абугабах А., Аль Смаді А. Інтелектуальне застосування RFID в охороні здоров'я: інвентаризація та логістика медичних систем // *IEEE Xplore*. – 2022.
12. Сміт А. Застосування RFID у системах охорони здоров'я з операційної точки зору // *IGI Global*. – 2019. – № 6. – С. 28.
13. Байкер К. Розробка системи керування та моніторингу лікарських засобів на основі RFID у державних лікарнях Танзанії [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <http://dspace.nm-aist.ac.tz/handle/20.500.12479/50>.
14. Khan M. A., Zubair S., Gondal T. M. та ін. Підвищення безпеки та конфіденційності в медичних системах за допомогою полегшеного RFID-протоколу // *Sensors*. – 2023. – Т. 23, № 12. – С. 5518.
15. Raso E., Bianco G. M., Marrocco G. Орієнтовані на конфіденційність архітектури для NFC та RFID-сенсорів у медичних застосунках // *Sensors*. – 2022. – Т.22, №24. – С. 9692.
16. Bianco G., Raso E. UHF RFID та NFC у точках медичного обслуговування: архітектура, безпека та реалізація [Електронний ресурс] // *arXiv*. – 2023. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2304.08015>
17. Marchang J., Al-Dubai A., Al-Rakhami M. та ін. Безпечна за дизайном архітектура Інтернету медичних речей у реальному часі для моніторингу здоров'я населення (RTPM) // *Informatics*. – 2024. – Т. 5, № 3. – С. 31.
18. Almotiri S. H., Amoon M., Alamri H. S. Ефективна медична інформаційна система на основі RFID та хмарної архітектури IoT // *Healthcare*. – 2023. – Т. 11, № 22. – С. 3067.
19. Abouelmehdi K., Beni-Hssane A., Khaloufi H. До архітектури на основі мікросервісів для безпечних та масштабованих медичних інформаційних систем // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2022.
20. Sun Y., Luo Y., Xu H. Децентралізоване управління даними для медичного Інтернету речей із використанням блокчейну та edge-баз даних // *IEEE Access*. – 2022. – Т. 10. – С. 69312–69325.
21. Gupta R., Kumar P., Bhattacharya S. Використання NoSQL-баз даних для аналітики великих медичних даних // *Journal of Big Data*. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 45.

REFERENCES

1. Radio Frequency Identification (RFID) in health care: Where are we? A scoping review. (2023). *Health and Technology*.
2. The adoption and implementation of RFID technologies in healthcare: A literature review. (2023). *Journal of Medical Systems*.

3. The benefits and barriers to RFID technology in healthcare. (2023). *HIMSS*.
4. Bendavid, Y., & Boeck, H. (2011). RFID in healthcare: A framework for uses and opportunities. *Journal of Medical Systems*, 35(3), 397–405. <https://doi.org/10.1007/s10916-010-9402-y>
5. Ohashi, K., Ota, S., Ohno-Machado, L., et al. (2010). Improving patient safety through RFID technology. *Healthcare Informatics*, 27(6), 45–52.
6. Perez, M., Thompson, J., & Lee, H. (2012). The impact of RFID technology on patient tracking and medication administration. *Journal of Healthcare Management*, 57(4), 123–135.
7. Fry, E., & Lenert, L. (n.d.). RFID tracking of patients, staff, and equipment to enhance hospital response to mass casualty events. In *AMIA Annual Symposium Proceedings*.
8. Hakim, H., Renouf, R., & Enderle, J. (2006). Passive RFID asset monitoring system in hospital environments. In *Proceedings of the IEEE 32nd Annual Northeast Bioengineering Conference*.
9. Kumar, S., Swanson, E., & Tran, T. (2009). RFID in the healthcare supply chain: Usage and application. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, 22, 67–81. <https://doi.org/10.1108/09526860910964843>
10. Gómez, S., & Suárez, E. (n.d.). RFID + Wi-Fi system to control the location of biomedical equipment within hospital areas and linked to an intelligent inventory. *SpringerLink*.
11. Bochem, A., Abugabah, A., & Al Smadi, A. (2022). Smart RFID application in health care: Using RFID technology for smart inventory and logistic systems in hospitals. *IEEE Xplore*.
12. Smith, A. D. (2019). RFID applications in healthcare systems from an operational perspective. *IGI Global*, 6, 28.
13. Baicker, K. (2023). Development of radio frequency identification (RFID)-based drug management and monitoring system: Case of public hospitals in Tanzania [Electronic resource]. Retrieved from <http://dspace.nm-aist.ac.tz/handle/20.500.12479/50>
14. Khan, M. A., Zubair, S., Gondal, T. M., et al. (2023). Enhancing security and privacy in healthcare systems using a lightweight RFID protocol. *Sensors*, 23(12), 5518. <https://doi.org/10.3390/s23125518>
15. Raso, E., Bianco, G. M., & Marrocco, G. (2022). Privacy-aware architectures for NFC and RFID sensors in healthcare applications. *Sensors*, 22(24), 9692. <https://doi.org/10.3390/s22249692>
16. Bianco, G., & Raso, E. (2023). UHF RFID and NFC point-of-care: Architecture, security, and implementation [Electronic resource]. arXiv. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2304.08015>
17. Marchang, J., Al-Dubai, A., Al-Rakhami, M., et al. (2024). Secure-by-design real-time Internet of Medical Things architecture for e-health population monitoring (RTPM). *InformatICS*, 5(3), 31. <https://doi.org/10.3390/informatICS5030031>
18. Almotiri, S. H., Amoon, M., & Alamri, H. S. (2023). An efficient healthcare information system using RFID and IoT-based cloud architecture. *Healthcare*, 11(22), 3067. <https://doi.org/10.3390/healthcare11223067>
19. Abouelmehdi, K., Beni-Hssane, A., & Khaloufi, H. (2022). Towards a microservices-based architecture for secure and scalable healthcare information systems. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03778-y>

20. Sun, Y., Luo, Y., & Xu, H. (2022). Decentralized data management for healthcare IoT using blockchain and edge databases. *IEEE Access*, 10, 69312–69325. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187435>

21. Gupta, R., Kumar, P., & Bhattacharya, S. (2023). Leveraging NoSQL databases for big healthcare data analytics. *Journal of Big Data*, 10(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00752-2>

Received 23.01.2026.

Accepted 26.01.2026.

Designing an efficient architecture for an RFID-oriented medical system

Modern healthcare institutions face growing challenges in managing medical data effectively and ensuring automation of routine processes. Radio Frequency Identification (RFID) technology has proven to be a powerful tool for improving patient identification, reducing human error, and streamlining data access and logistics within hospitals. However, limited attention has been given in recent studies to comprehensive integration of RFID systems with existing medical information infrastructures, particularly concerning data protection and architectural design.

This paper proposes an efficient client-server architecture for RFID-based medical systems, aimed at ensuring secure and scalable handling of medical records. The research analyzes a range of architectural approaches, including simple local RFID configurations, peer-to-peer networks, and microservice models, outlining their limitations in the healthcare context. As a result, a custom client-server model has been developed using a relational database and secure API-based communication between server and multiple client types (web and mobile).

The proposed architecture supports centralized data storage and processing, ensures integrity and confidentiality of patient information, and enables flexible integration with third-party healthcare platforms. A modular database design is also presented, including patient profiles, medical history, prescriptions, and user management.

Comparative analysis demonstrates that the proposed model outperforms traditional architectures in scalability, automation, and data security. By minimizing administrative workload and enhancing access to reliable patient data, the system improves quality of care and opens perspectives for further research and innovation in medical IT solutions.

Keywords: RFID technologies, medical information systems, relational databases, client-server architecture, automation, medical records, patient identification, data protection.

Смоленський Микита Михайлович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>.

Сіденко Євген Вікторович - доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Україна.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

Smolenskyi Mykyta Mykhailovych - postgraduate student at the Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3071-4350>.

Sidenko Yevgen Viktorovych - associate professor at the Department of Intellectual Information Systems, Petro Mohyla Black Sea National University, Ukraine.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6496-2469>.

**МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТІЛ ЖИВИХ ЛИЧИНОК
У ЗНИЩЕННІ ШКІДНИКІВ АКУСТИЧНИМ СПОСОБОМ**

Анотація. З метою знищення шкідливих комах та їх личинок акустичним способом розроблені методики розрахунків та експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок колорадського жука. Робота проводиться в рамках розділу прикладної механіки «Біомеханіка». Запропонований та використаний у вимірах механічних характеристик новий пристрій для проведення експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок, конструктивна схема якого захищена патентом України на винахід та корисну модель. Знищення личинок колорадських жуків акустичними хвилями дозволить перейти від хімічних методів знищення шкідників, що токсичні для людини, до екологічно чистого, акустичного. Тім визначається актуальність обраної теми.

Ключові слова: живі тіла, механічні характеристики, личинки колорадського жука, пристрій, експериментальні дослідження, акустичний вплив, знищення.

Вступ Одним з важливих розділів прикладної механіки є біомеханіка. Біомеханіка – це наука, яка вивчає механічні властивості та рухи живих систем. Тут використовуються принципи та методи класичної механіки. Ця наука аналізує рухи тіла людини, тварин, а також механічні характеристики тканин, органів та рідин в організмах. Так як біомеханіка використовує моделі і методи загальної теорії механіки для вивчення механічних властивостей живих тканин, тому цілком реально застосувати ці методи до моделювання механічних характеристик живих тіл різного типу [1-4]. Відомі роботи вчених В. Т. Гринченка, І. В. Вовка, С. А. Найди, В. Г. Савіна, В. С. Дидковського, О. Г. Лейка, Е. М. І. К. Коська, Е. М. Малишева, В. К. Фролова, І. Г. Хорбенка, L. Pimonov, W. Tempest та їх учнів з визначення поведінки живих істот і особливо, людини, під впливом вібраційних та акустичних коливань [1-13].

У 20-му столітті опубліковано досить широку кількість наукових праць, в яких зазначено про позитивний і негативний вплив коливань на живі організми. Позитивний вплив акустичних коливань на організм людини все ширше знаходить застосування у сучасній медицині. Це тепловий ефект в ультразвуковій терапії, використання ультразвуку для візуального дослідження у діагностиці стану здоров'я людського організму, застосування віброакустичних коливань у діапазоні від 20 до 20000 Гц у приладах типу

«Вітафон» для лікування захворювань окремих органів людини, новітні слухові апарати (С. А. Найда [14]).

Шкідливий вплив вібрації на людей, які застосовують у своїй роботі відбійні молотки, працюють водіями на транспорті та просто використовують транспорт для поїздки, широко та докладно описано у літературі [5-7, 9-12, 15]. Є дані і про шкідливий вплив як акустичних шумів, так і тональних акустичних коливань на організм людини у цехах на виробництві. Особливо шкідливий вплив мають ті коливання, частота яких збігається з резонансною частотою всього тіла або окремих органів. Внаслідок вище викладеного можна дійти до висновку про передумови створення акустичного пристрою, що надає шкідливий і навіть смертельний вплив геть на організми шкідників у сільському господарстві.

Вже відомі наукові роботи, в яких показано, як акустичні поля, що генеруються приладами різного типу, взаємодіють з організмами різних живих істот. Наприклад, відома робота авторів Кошиць Ю. Ш., Лейко О. Г., Омельченко О. Ф., Федоренко Ю. О., в якій викладено електронну концепцію боротьби з гризунами та захист від них об'єктів соціально-побутової та виробничої сфери [16, 17, 18]. В експериментах над щурами, собаками, вівцями показано, що там, де фаза впливу інфразвуку (ІЗ) була протилежна фазі серцевих скорочень, у тварин зафіксована повна зупинка серця. Для успішної боротьби за допомогою акустичних полів з гризунами та іншими шкідниками, наприклад комахами, необхідне знання резонансних частот їх організмів або окремих органів.

Проведені науково-дослідні роботи з дослідження впливу акустичних коливань як шкідливого на колорадського жука (Г. І. Сокол, А. В. Сокол, О. М. Дупліщева). В даний час широко використовуються такі методи боротьби з колорадськими жуками: хімічні препарати, механічні методи боротьби (відомі пирососи, що затягують у ємність колорадських жуків з кущів картофелю, а потім цих жуків просто знищують механічним тиском), знищення колорадського жука за допомогою інших живих істот, виведення сортів картоплі, непридатних в якості їжі для колорадського жука. Відомі методи не завжди екологічно чисті чи малоефективні. Наприклад, якщо кур запускали на ділянку з картоплею для того, щоб вони знищили колорадських жуків, то констатовано, що кури скльовують також листя рослин та затоптують кущі.

У роботах [5, 9] наведено, що для розробки акустичного способу знищення шкідливої комахи необхідно мати три основні величини: масу тіла шкідливої комахи, жорсткість і резонансну частоту тіла.

Описані вище ефекти є передумовою для створення акустичних способів та пристроїв, що надають згубну дію на організми шкідливих комах взагалі.

Порівняно з відомими механічними, хімічними та біологічними способами акустичний забезпечує зниження трудомісткості робіт зі знищення шкідливої комахи. Треба враховувати, що хімічні методи ще й токсичні і для організму людини. В той час як, акустичний спосіб не чинить токсичної дії.

Наступним кроком повинні бути виконані дослідження з можливості знищення акустичними способами живих личинок колорадського жука. Розробка цього методу є важливим завданням. Це визначає актуальність обраної теми досліджень.

Мета і завдання. *Метою роботи* є розробка методик розрахунків та експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок колорадського жука для подальшого знищення личинок акустичним способом.

При цьому вирішувались *наступні завдання*: - розробити методику та провести розрахунки основних механічних характеристик тіл живих личинок: геометричних параметрів тіла, маси тіла, жорсткості, модулю Юнга, жорсткості резонансної частоти шляхом модулюванням тіл личинок циліндрами кінцевої довжини зі сталим перетином;

- провести обґрунтування впливу акустичних випромінювань, довести ефективність акустичного способу знищення личинок;

- розробити методику експериментальних визначень механічних характеристик тіл живих личинок;

- створити принципову схему й конструкцію пристрою для вимірювань;

- провести вимірювання та аналіз отриманих результатів;

- видати рекомендації для проектування акустичних пристроїв для знищення живих личинок колорадського жука. Це дозволить у подальшому визначитися з характеристиками пристроїв: частотою і амплітудою генерування акустичного поля, яке буде негативно впливати на тіло живої личинки колорадського жука.

Об'єктом дослідження є способи та пристрої для знищення шкідників рослин на основі моделювання та створення методик розрахунків механічних характеристик живих тіл шкідників рослин.

Предметом дослідження є створення методик розрахунків та експериментальних вимірювальних робіт з визначення характеристик живого тіла личинки колорадського жука, а також створення пристрою для проведення вимірювань.

Методи досліджень базуються на теоретичних основах опору матеріалів, використанні знань з методів вимірювальної техніки.

Постановка задачі. В основу розробки акустичного способу, який би оказував згубну дію на тіло живої личинки колорадського жука, покладені дослідження про негативний вплив акустичних коливань на тіло людини чи тіло шкідників рослин. При цьому враховуємо, що згубний вплив акустичних коливань на живе тіло має найбільшу ефективність, коли частота впливу та власна частота тіла співпадають. Як показують рішення відомих рівнянь механіки, визначити значення резонансної частоти тіла можливо, якщо відомі механічні характеристики цього тіла. Тобто геометричні параметри, маса, жорсткість, модуль Юнга.

Тому припускаємо, що тіло живої личинки колорадського жука моделюється як циліндричне пружне тіло із сталим перетином.

Для знаходження значення резонансної частоти розрахунковим шляхом та шляхом експериментальних досліджень будемо визначати геометричні параметри, масу тіл личинок, жорсткість, модуль Юнга. А потім отримаємо значення резонансної частоти

тіла на основі відомих рівнянь і співвідношень. Виконання цього завдання визначає актуальність обраної теми.

Аналітичний огляд. Насамперед розглянемо відомі роботи про негативний вплив акустичних коливань на людей. Відомо [1, 5, 6-12], що до факторів, несприятливо впливаючих на організм людини, відносяться вплив низькочастотних акустичних коливань і, зокрема, інфразвуку (ІЗ), інфразвукового шуму (ІЗ - шуму) У роботах авторів: В.С. Дідковського, V. Gavro, L. Pimonov, Е.М. Малишева, А.В. Римського - Корсакова, В. Темпест, Е. І. Андрєєва - Галаніна наведені дані про шкідливу дію на організм обслуговуючого персоналу промислових і транспортних об'єктів, наукових лабораторій низькочастотних акустичних коливань [1, 6, 10]. В Україні розроблено та впроваджено до виконання норми безпеки при роботі людей в умовах впливу на їх організми інфразвукових коливань ("Санітарні норми інфразвуку на робочих місцях» № 2274-80) [15]. Характеристикою, по якій роблять оцінку дії акустичних коливань на живі організми, приймають величину звукового тиску або рівень звукового тиску, виражений в дБ (УЗ). Навіть при рівні звукового тиску 100 дБ і вище слід обмежувати час перебування людей в зоні поширення інфразвукових хвиль.

В [12, 19, 20] описано специфічну дію вібрацій та низькочастотних акустичних коливань на організми космонавтів, обумовлене тим, що резонансні частоти найважливіших органів людини лежать в діапазоні частот 0,5 - 20 Гц. Інфразвук викликає уповільнення зорової реакції, зміна ритмів дихання і биття серця, розлади шлунка і центральної нервової системи, головний біль, відчуття неспокою. В роботі [19] запропонована методика визначення резонансних частот органів космонавтів методом електромеханічних аналогій. Робота має важливе значення для проектних робіт з демпфування коливань у кабіні корабля космонавтів в час руху ракети повздовж ділянки виведення на орбіту.

Таким чином, роботами багатьох дослідників показано, що акустичні коливання в багатьох випадках мають шкідливий вплив на живі організми.

В роботах [21-26] наведені результати моделювання механічних характеристик тіл вірусів як пружних структур. Тут проведений аналітичний огляд існуючих способів знищення вірусів і доведена актуальність про необхідність знаходження нового способу. Проаналізовані декілька випадків специфіки проникання вірусів у порожнини органів дихання людини. Проведено попередні розрахунки основних механічних характеристик тіла вірусу: маси, об'єму тіла, резонансної частоти, що буде згубною для тіла вірусу.

Також відомо [27, 28] використання вібраційних технологій для визначення жорсткості і резонансної частоти тіла шкідника рослин колорадського жука. Проводилося визначення цілісності тіла і виживання жуків після впливу на них вібраційними коливаннями в лабораторних умовах [29-35].

При дослідженні коливань всього тіла біологічного об'єкта або окремих його органів, викликаних дією зовнішніх механічних збурень, тіло слід розглядати як конструкцію або систему з механічних елементів, що володіють інерційними, пружними,

демпфувальними і іншими властивостями. Вид і характер рівнянь, що описують коливальні рухи тіла біологічного об'єкта або окремих його частин, визначаються прийнятими апроксимаціями і припущеннями, межі застосування яких повинні виводитися з основних законів фізики досліджуваних явищ. Для побудови математичної моделі біологічного об'єкта необхідні дані про його фізико-механічні і структурні характеристики.

Прийнято поведінку пружного тіла промодельовувати за допомогою пружин, а в'язкого тіла за допомогою поршня у циліндрі, тоді поведінку реальної механічної системи можна описати, використовуючи методи електро-механічних аналогій. Тут використовуються рівняння з визначення мас, жорсткостей та пружності багатомасових механічних систем.

На цій основі можна записати рівняння руху тіл шкідливих комах, вірусів. Тобто як в'язко пружної коливальної системи [23, 24, 30].

Відомий раніше розроблений спосіб, який надає згубний вплив на тіло колорадського жука на основі дії на нього акустичними хвилями [29, 30, 32-35]. Отриманий патент [29] «Спосіб визначення механічних характеристик живих тіл», що полягає в механічному впливі на тіло тканини живої істоти силою зі змінною амплітудою та частотою та наступним їх розривом. Новий спосіб відрізняється тим, що механічний вплив на тіло і тканини живої істоти здійснюють знакозмінною силою з частотою вібраційних коливань та амплітудою, яка дорівнює відношенню сили розриву сполучних тканин тіла до їх площі перерізу, і частотою рівній власній частоті живого тіла.

Проведені дослідження по впливу згубної дії акустичних коливань на тіло шкідливого комах. Отриманий позитивний ефект [35]. Розроблено та захищені патентами декілька варіантів конструкцій акустичних випромінювачів, призначених для знищення колорадських жуків акустичними хвилями тобто на електродинамічному принципі роботи та на основі сирен [29, 30].

З аналізу наведених робіт пропонується акустичний метод знищення тіл живих личинок колорадського жука, що полягає в механічному впливі на їх тіло тиском з наступним їх розривом. Причому механічний вплив на тіло здійснюють акустичними коливаннями з амплітудою звукового тиску в повітрі, що дорівнює відношенню сили розриву тканин тіл личинок в їх площі перетину і частотою, що дорівнює власній частоті.

Рішення завдання Моделюємо тіло живої личинки спрощено циліндром із сталим перетином. В такому випадку жорсткість тіла личинки C можна знайти з виразу [37]:

$$C = \frac{P}{\Delta l} \tag{1}$$

де P - сила, що діє на личинку, Δl - абсолютне стискання личинки.

Відомо, що для тіла циліндричної форми [37]:

$$\frac{P}{\Delta l} = \frac{EF}{d} \tag{2}$$

де E - модуль поздовжньої пружності, що характеризує жорсткість матеріалу, тобто опір його пружним деформаціям, F - площа поперечного перерізу тіла личинки циліндричної форми, d - діаметр циліндричного тіла. Відповідно вираз для знаходження значення E модулю поздовжньої пружності на основі (1) а (2) виглядає:

$$E = \frac{c \cdot d}{F}, \quad (3)$$

Де для площини перетину маємо

$$F = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (4)$$

Бачимо, що попервах треба визнати геометричні параметри тіла личинки на основі вимірів. Тому складаємо методику вимірів, що дасть нам можливість скласти дані о геометричних та масових характеристиках тіла личинки. Величину Δl абсолютного стискання личинки можна отримати теж тільки на основі проведення вимірів у спеціальному пристрої. Результати розрахунку жорсткості, площі поперечного перерізу і модуля поздовжньої пружності тіла личинки, резонансної частоти тіла записуються в таблицю після проведення вимірів.

Методика вимірів Виміри проводилися в умовах приміщення лабораторії кафедри технічної механіки [38-42]. Для вимірів використаний пристрій, що показаний на рисунку 1.



Рисунок 1 — Фото пристрою та допоміжних вимірювальних інструментів: ваги та мікрометр

Послідовність виконання вимірювань.

1. Вимірюємо довжину та діаметр кожної з живих личинок, що обрані до експерименту.
2. На вагах міряємо та фіксуємо вагу кожної з личинок.
3. Живу личинку розміщуємо в стакані пристрою. За допомогою мікрометра фіксується висота тіла личинки.
4. Далі до кожної з личинок послідовно по черзі прикладається навантаження силами P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 , [Н] величина яких контролюється за допомогою манометра. Це здійснюється шляхом додавання гирьок на навантажувальне пристосування.
5. Після навантаження фіксуємо мікрометром нове значення висоти тіла личинки.
6. Рахуємо стиснення Δl .

7. Всі дані вимірів заносимо у таблицю 1.

8. Розраховуємо модуль Юнга та жорсткість тіла живої личинки. Дані рахунків заносимо у таблицю 2. В таблицях позначені: № — номер вимірювання при проведенні експерименту, G — вага тіла личинки, l — висота циліндру, що є тілом личинки, d — діаметр циліндру.

Проведені виміри і розрахунки за підсумком дозволяють знайти резонансну частоту f тіла живої личинки з математичного виразу [27, 28]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (5)$$

де C - жорсткість тіла личинки, f - резонансна частота, m – маса тіла живої личинки.

Таблиця 1

Показання вимірів

№	$G \times$ (10^{-6} N)	$l \times$ (10^{-3} m)	$d \times$ (10^{-3} m)	$P_1=20 \times 10^{-6}$ N $\Delta l \times 10^{-3}$ m	$P_2=25 \times 10^{-6}$ N $\Delta l \times 10^{-3}$ m	$P_3=30 \times 10^{-6}$ N $\Delta l \times 10^{-3}$ m	$P_4=35 \times 10^{-6}$ N $\Delta l \times 10^{-3}$ m	$P_5=40 \times 10^{-6}$ N $\Delta l \times 10^{-3}$ m
1	120	6.0	5.00	0.820	0.930	1.680	1.800	2.180
2	100	9.0	6.00	0.640	0.875	1.190	1.610	1.840
3	150	10.0	7.00	0.630	0.755	1.500	1.590	1.950
4	110	7.5	5.10	0.620	0.860	1.180	1.620	1.820
5	150	9.0	5.15	0.750	0.960	1.210	2.050	2.420

Дані розрахунків наведені у таблиці 2. В таблиці позначені Δl - абсолютне стиснення личинки, C - жорсткість тіла личинки, F – площа перетину тіла, E - модуль Юнга, f - резонансна частота.

Таблиця 2

Результати розрахунків

№	Δl , m	C , N/m	F , m^2	E , Pa	f , Hz
1	0.00082	0.2393		60.96	7.1088
	0.00093	0.2636		67.17	7.4623
	0.00168	0.1752	0.0000196	44.63	6.0826
	0.0018	0.1907		48.59	6.3468
	0.00218	0.18		45.86	6.1658
2	0.00064	0.3066		65.09	8.8146
	0.000875	0.2802		59.50	8.4275
	0.00119	0.2473	0.0000283	52.51	7.9171
	0.00161	0.2132		45.27	7.3513
	0.00184	0.2133		45.28	7.3519
3	0.00063	0.3114		56.67	7.2540
	0.000755	0.3248		59.10	7.4077
	0.0015	0.1962	0.0000385	35.70	5.7577
	0.00159	0.2159		39.29	6.0399
	0.00195	0.2012		36.62	5.8310
4	0.00062	0.3164		79.07	8.5389
	0.00086	0.2851		71.24	8.1051
	0.00118	0.2494	0.0000204	62.32	7.5805
	0.00162	0.2119		52.95	6.9876
	0.00182	0.2156		53.87	7.0481
5	0.00075	0.2616		64.76	6.6484
	0.00096	0.2554		63.23	6.5693
	0.00121	0.2432	0.0000208	60.21	6.4106
	0.00205	0.1675		41.46	5.3193
	0.00242	0.1621		40.14	5.2342

Обговорення результатів експерименту. Таким чином, у результаті експериментів отримані необхідні дані про геометричні та фізико-механічні характеристики тіл живих личинок, що необхідні для побудови математичної моделі коливань біологічного об'єкта: личинки колорадського жука. Отримані значення жорсткостей тіл живих личинок становлять від 1,1621 н/м до 0,3248 Н/м. Значення модуля пружності від 36,62Па до 79,07Па. Значення резонансних частот склали від 5,2342Гц до 8,5389Гц.

Визначене значення резонансної частоти такого тіла дозволить спроектувати пристрій, що зможе оказувати згубну дію на шкідника рослин.

Вимірювальний пристрій для реалізації експериментів. Пристрій деформації личинки колорадського жука відноситься до вимірювальних приладів і може бути використаний для знаходження деформації личинки. В подальших дослідженнях це дозволить знайти резонансну частоту личинок комахи з метою їх подальшого знищення впливом акустичних хвиль на тій же частоті.

Відомі прилади з вимірювань механічних характеристик будівельних конструкцій [39]. Недоліками цих приладів є те, що вони призначені для виміру деформацій будівельних опор, а не живих, малих за розмірами тіл. Також прилади мають невелику точність вимірювань. Пристрої працюють в парі з розривними, бо вони не здатні на самостійне навантаження досліджуваного зразка. Це в свою чергу ускладнює процес вимірювання деформацій. Такі прилади не призначені для проведення вимірювань механічних характеристик живих організмів.

Відомий пристрій визначення деформації клейковини [42], що містить раму, зовнішній корпус, опірний столик з плоскою робочою поверхнею, навантажувальне пристосування з пуансоном і відліковим пристроєм, гальмуючий механізм, реле часу. Відліковий пристрій має прозору шкалу, екран і вказівник. Він використовується згідно Держстандарту 27839-88 для вимірювання деформації клейковини під визначеним навантаженням, при цьому діагностується якість клейковини зерна і борошна. Пристрій 30 секунд впливає на зразок клейковини з певним навантаженням. По закінченню 30 секунд за допомогою оптичного датчика фіксується деформація зразка, навантаження знімається і видається результат. Щоб зафіксувати деформацію в приладі використовується здатність клейковини пропускати світло. Кількість світла, що пропускається клейковиною, зменшується з її більшою деформацією. По закінченню вимірів прилад видає результат в одиницях виміру ВДК (коефіцієнт якості клейковини), що не є прийнятним для загального використання у техніці.

Недоліком вимірювання деформації цим приладом є те, що в основу вимірів деформації покладена властивість клейковини пропускати світло, тому пристрій не може бути застосовано для знаходження деформацій непрозорої личинки колорадського жука чи іншої біологічної живої істоти. Також у пристрої використовується занадто велике навантаження, із за чого він не може бути застосований для роботи з комахами. Він також не оснащений необхідними кріпленнями. У ньому відсутня можливість регулювання навантаження, в той час, як у випадку вимірів деформацій живої істоти потребується змінне навантаження.

В основу конструктивної схеми нового приладу [39] покладена задача розробки пристрою вимірювання деформацій живих личинок колорадського жука, що подалі зробить можливим провести розрахунки резонансної частоти личинки комахи та дозволить ефективно знищувати цих шкідників випромінюванням акустичних хвиль на визначеній частоті.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрої, який містить раму та навантажувальне пристосування новим є те, що навантажувальне пристосування має стакан для закріплення живої личинки з направляючою та гвинтовою парою для регулювання висоти стакану. На напрямній стакану приєднана шарнірно гойдалка, на гойдалку оказують тиск гирьки і далі цей тиск передається на тіло личинки. До стакану приєднується манометр, що дозволяє виміряти величини навантаження на живу личинку. Використовується мікрометр для вимірювання деформацій тіл живих личинок.

На кресленні (дивись рисунок 2) показано схему конструкції приладу. Пристрій містить раму 1, гойдалку 2, навантажувальні гирьки 3, стакан 7 з напрямною 4 для регулювання висоти, оскільки личинки можуть відрізнятись по довжині, гвинтову пару 5, манометр 6.

На рисунку 2 показана принципова схема вимірювального пристрою деформацій тіла личинки колорадського жука.

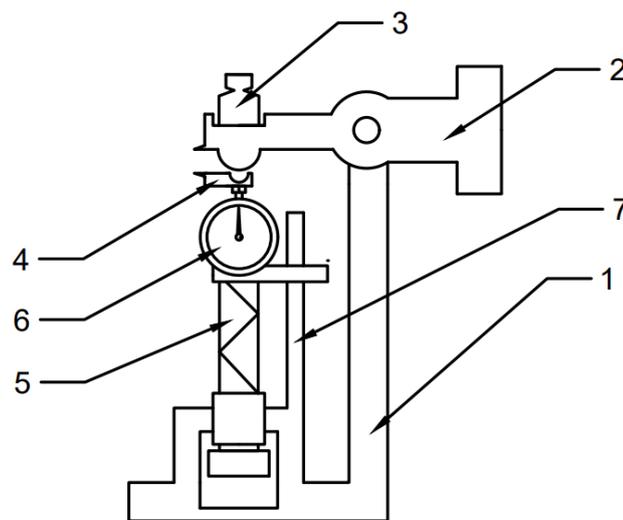


Рисунок 2 — Вимірювальний пристрій деформацій тіла личинки колорадського жука [39]

Пристрій працює наступним чином. Стакан 7 з напрямною 4 опускається в нижнє положення за допомогою підкручування гвинтовою парою 5, в ньому розташовується личинка. Після цього напрямна 4 піднімається вгору до моменту торкання личинки до навантажувальних гирьок 3. За допомогою мікрометра фіксується висота личинки. Далі до тіла личинки по черзі прикладається навантаження силами P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 , величина яких контролюється за допомогою манометра 6.

Перед кожним наступним навантаженням мікрометром 6 фіксується довжина личинки, а після навантаження її стиснення.

Наведений пристрій дозволяє провести виміри механічних характеристик тіл личинок колорадського жука, а тобто: висоту, стиснення, навантаження, діаметр циліндричного тіла личинки. Що далі дозволяє провести розрахунки модуля повздовжньої пружності, площини перетину тіла, резонансної частоти. Та розробити акустичний пристрій для згубної дії коливаннями на шкідника рослин: личинку колорадського жука. Важливим моментом тут є те, що треба визначитися з частотою згубної дії, яка з точки зору енергетики, повинна дорівнюватися резонансній частоті тіла личинки.

Пристрій, що пропонується, розрахований на роботу з живими личинками колорадського жука, має надійний спосіб вимірювання деформацій при навантаженні розтягування-стиск непрозорих тіл. Для цього в його складі є навантажувальне пристосування, що має стакан для закріплення живої личинки з напрямною та гвинтовою парою для регулювання висоти стакану, на напрямній стакану приєднана шарнірно гойдалка, на гойдалку оказують тиск гирьки і далі на тіло личинки, до стакану приєднується манометр, що дозволяє виміряти величини навантаження на живу личинку й є мікрометр для вимірювання деформацій тіл живих личинок. Це робить можливим проведення розрахунків резонансної частоти личинок комах та дозволяє ефективно знищувати цих шкідників випромінюванням акустичних хвиль.

Наукова новизна:

1. Вперше запропоновано використати згубний вплив акустичних коливань на тіло шкідників рослин: живих личинок колорадського жука.

2. Розроблені методики визначення механічних характеристик тіла живих личинок колорадського жука з метою страти через вплив акустичними коливаннями з частотою, що дорівнює резонансній частоті його тіла. Для цього прописані послідовні операції в експерименті з визначення геометричних та фізико-механічних характеристик тіл живих личинок, та послідовність наступних розрахунків жорсткості, модуля пружності та резонансної частоти тіл живих личинок колорадського жука. Отримані значення жорсткостей тіл живих личинок становлять від 1,1621 н/м до 0,3248 Н/м. Значення модуля пружності від 36,62Па до 79,07Па. Значення резонансних частот склали від 5,2342Гц до 8,5389Гц.

3. Запропонований та захищений патентом України на корисну модель новий вимірвальний пристрій деформацій тіла личинки колорадського жука. Використання пристрою дозволило провести експериментальні дослідження з визначення геометричних та фізико-механічних характеристик тіл живих личинок колорадського жука.

Висновки. Проведений аналітичний огляд методів, засобів та методик, які використовує біомеханіка для досліджень живих тіл. На основі огляду існуючої наукової літератури наведений висновок, що вібраційні та акустичні коливання вказують як позитивний, так і негативний вплив на живі організми: людей, кротів, шкідливих комах тощо. На основі отриманих результатів можна видати рекомендації з проектування та конструювання акустичних пристроїв, дія яких заснована на негативному акустичному впливу на тіла живих комах.

Проведений аналітичний огляд існуючих методів боротьби зі шкідниками рослин дозволив розділити їх на: хімічні препарати, механічні методи боротьби, знищення колорадського жука за допомогою живих організмів, виведення сортів картоплі, непридатних в якості їжі для колорадського жука та інші. Відомі методи не завжди екологічно чисті та малоефективні. Доведена актуальність про необхідність знаходження нових способів знищення шкідників рослин. А саме, акустичного.

На основі експериментів з впливом вібраційних та акустичних коливань на живі тіла колорадських жуків зроблено висновок, що для розробки акустичного способу знищення шкідливої комахи необхідно мати такі основні величини: геометричні розміри, масу тіла шкідливої комахи, жорсткість і резонансну частоту тіла. Наведені наукові роботи, де ці механічні характеристики визначені. В них показано, як випробувано згубну дію акустичних хвиль на колорадського жука у лабораторних умовах. Ефект загибелі жука отриманий для жука колорадського масою 100 мг при впливі на нього акустичними хвилями частотою 1500 Гц з рівнем звукового тиску 120 дБ.

Розроблені методики визначення геометричних та фізико-механічних характеристик тіл живих личинок колорадського жука: для проведення експериментів та розрахунків. Тобто, спочатку проводяться виміри геометрії тіл, на вагах визначення мас. Потім з використанням нового пристрою (пристрій запатентований в Україні, вимірювальний пристрій деформацій личинки колорадського хруща. Патент України на корисну модель № 153662, Україна, МПК G01L 5/06 (2006/01), Сокол Г.І., Алексеєнко С.В., Снобко Д.О. Заявка № u 2020 04959. заявл. 23.12. 2022, опубл.09. 08. 2023.) проводиться вплив визначеними силами на тіла і вимірюється їх стиснення.

Усі ці дані експерименту дозволяють визначитися з модулем пружності тіла та жорсткістю. Використані дані вимірювань при проведенні розрахунків резонансної частоти тіла живої личинки. Отримані значення жорсткостей тіл живих личинок становлять від 1,1621 н/м до 0,3248 Н/м. Значення модуля пружності від 36,62Па до 79,07Па. Значення резонансних частот склали від 5,2342Гц до 8,5389Гц.

У перспективі дані експерименту та розрахунків дозволять спроектувати нові акустичні пристрої, що зможуть оказувати згубну дію на тіло шкідника рослин.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Дідковський, В. С., Коржик, О. В., & Лейко, О. Г. (2010). Шуми та вібрації: підручник. Київ: Імекс-ЛТД. 336 с.
2. Wikipedia: вільна енциклопедія. (2025, жовтень 3). <https://uk.wikipedia.org/>
3. Костюк, І. В. (2000). Введення в біомеханіку: навч. посіб. Львів: Держ. ун-т «Львів. політехніка». 224 с.
4. Глазер, Р. О. (1985). Нарис основ біомеханіки. Му Світ. 180 с.
5. Сокол, А. В., & Сокол, Г. И. (2001). О влиянии низкочастотных акустических колебаний на живые организмы. Акустический вестник, 4(3), 67–69.
6. Малышев, Э. Н. (1972). Исследование инфразвука как вредного фактора и пути снижения его интенсивности на предприятиях железнодорожного транспорта (Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.06). Ленинград. 176 с.

7. Гринченко, В. Т. (2007). Действие низкочастотного звука и вибраций на человека. У Акустический симпозиум «Консонанс 2007» (Київ, 25–27 вересня 2007 р.): зб. праць (с. 3–20). Київ.
8. Вовк, И. В., Гринченко, В. Т., Дахнов, С. Л., Крижановский, В. В., & Олейник, В. Н. (1999). Шумы дыхания человека: объективизация аускультативных признаков. Акустический вестник, 2(3), 11–32.
9. Сокол, Г. И., Дуплищева, О. М., & Рыбалка, Т. А. (2009). О воздействии звуковых и инфразвуковых акустических колебаний на живые организмы. Экологія та ноосфера, 20(3–4), 15–25.
10. Сокол, Г. И. (2000). Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот. Днепропетровск: Промінь. 136 с.
11. Дідковський, В. С. (Ред.). (2002). Основи акустичної екології: навч. посіб. Кіровоград: Імекс-ЛТД. 520 с.
12. Горбенко, Е. В., & Сокол, Г. И. (2011). Научная работа д.т.н., профессора И. К. Косько по динамическому анализу и синтезу продольных нагрузок ракет: неопубликованные ранее страницы. Дніпропетр. нац. ун-т ім. О. Гончара. Серія «Історія і філософія науки і техніки», 19(1/2), 67–76.
13. Armand, A. C., Bikaran, M., Gardner, T. B., & Matthew, M. K. (2025). The role of infrasound and audible acoustic sound in modulating wound healing: A systematic review. *International Wound Journal*, 22(5), e70243. <https://doi.org/10.1111/iwj.70243>
14. Ляшко, Д. О., & Найда, С. А. (2022). Акустичне поле ультразвукового приладу для диференційної діагностики слуху людини. Мікросистеми, електроніка та акустика, 27(2(121)), 263239-1–263239-8. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.263239>
15. МОЗ України. (1999). Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037–99. Київ: МОЗ України. 79 с.
16. Аппарат виброакустического воздействия «Витафон». (1994). Технический паспорт и рекомендации по применению. Москва: Минздрав РФ. (Рег. удостоверение № 29-271/94).
17. Кошиць, Ю. Ш., Лейко, О. Г., Омельченко, О. Ф., & Федоренко, Ю. О. (1999). Електронна концепція боротьби з гризунами і захист об'єктів соціально-цивільної виробничої сфери при проектуванні і будівництві. Будівництво України, 1, 30–31.
18. Busnel, R. G., & Lehmann, A. G. (1978). Infrasound and sound: Differentiation of their physiological effects through use of genetically deaf animals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(3), 974–977.
19. Снобко, Д. О., & Сокол, Г. І. (2024). Методика визначення резонансних частот тіл космонавтів методом електромеханічних аналогій. Вісник Дніпровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка», 33(3), 74–79. <https://doi.org/10.15421/452453>
20. Sokol, G. I., Snobko, D. O., Kadilnikova, T. M., & Dalik, M. O. (2025). Method of electromechanical analogies in calculations of natural frequencies of multi-mass mechanical and biological systems. EGU General Assembly 2025, EGU25-10294. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-10294>
21. Сокол, Г. І., Соловійова, Н. М., & Шевченко, І. В. (2016). Акустичний спосіб знищення вірусів: пат. України № 104365. 25.01.2016. Бюл. № 2.

22. Сокол, Г. И., & Пугачев, А. С. (2020). К решению проблемы уничтожения вирусов акустическим способом. У Наукові читання «Дніпровська орбіта-2020» (с. 81–89). Дніпро: НЦАОМУ.
23. Молнар, Т. С., & Сокол, Г. І. (2023). Використання рівняння динаміки коливальних систем для опису механічних характеристик тіл вірусу. У XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос» (Дніпро, 12–14 квітня 2023 р.): зб. тез (с. 11). Дніпро: НЦАОМ.
24. Молнар, Т. С., & Сокол, Г. І. (2021). Визначення механічних характеристик тіла вірусу з метою реалізації способу знищення його акустичним впливом. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій, 33, 137–146.
25. Lucas, C., Klein, J., Sundaram, M. E., et al. (2021). Delayed production of neutralizing antibodies correlates with fatal COVID-19. *Nature Medicine*, 27(7), 1178–1186. <https://doi.org/10.1038/s41591-021-01355-0>
26. Wang, G., Liu, X., Shen, J., et al. (2021). A deep-learning pipeline for the diagnosis and discrimination of viral, non-viral and COVID-19 pneumonia from chest X-ray images. *Nature Biomedical Engineering*, 5, 509–521. <https://doi.org/10.1038/s41551-021-00704-1>
27. Снобко, Д., & Сокол, Г. (2024). Спосіб визначення механічних характеристик живих тіл. У Виклики та проблеми сучасної науки (CIMS 2024): зб. наук. пр., 2, 115–119. Дніпро. <https://fti.dp.ua/conf/2024/cims-2024-vernal/>
28. Пугачов, А. С., Сокол, Г. І., Савчук, Т. Л., & Сокол, А. В. (2021). Спосіб визначення механічних характеристик живого тіла: пат. України № 147036. 07.04.2021. Бюл. № 14.
29. Сокол, А. В., Сокол, Г. І., & Сокол, Т. В. (1998). Акустичний спосіб знищення колорадського жука і пристрій для його здійснення: пат. України № 25548. 25.12.1998. Бюл. № 6.
30. Sokol, G., & Rybalka, T. (2008). Elaboration and investigation of the acoustic method of elimination of Colorado beetle as element of a new ecological technology in protective means against plant vermin. *Scientific Space of Europe – 2008 (Sofia, Bulgaria)*, 26, 40–41. ISBN 978-966-8736-05-61
31. Sokol, G. I., Savchuk, T. L., Larichev, D. V., Rybalka, T. A., & Mironenko, E. S. (2019). Insect heart resonance appearance simulation of Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say). *International Journal of Avian & Wildlife Biology*, 4(3), 76–78. <https://doi.org/10.15406/ijawb.2019.04.00155>
32. Sokol, G. I., Molnar, T. S., & Sokol, A. V. (2023). Realization of acoustic method of Colorado beetle elimination. *Fundamental Research and Application of Physical Science*, 9, 50–63. <https://doi.org/10.9734/bpi/fraps/v9/1144G>
33. Sokol, G. I., Sokol, A. V., & Molnar, T. S. (2022). Acoustic method of Colorado beetle elimination: Experimental results. *New Trends in Physical Science Research*, 7, 61–72. <https://doi.org/10.9734/bpi/ntpsr/v7>
34. Сокол, Г. И. (2006). Определение динамических характеристик тел насекомых под воздействием вибрационных и акустических колебаний. У Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: зб. наук. праць, 7, 116–124. Дніпро: ДНУ.
35. Sokol, G. I., & Rybalka, N. A. (2009). Elaboration and investigation of the acoustic method of elimination of Colorado beetle. У *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences*, 3, 83–86. Paper No. DETC2009-82587.

36. Сокол, Г. І., Севостьянчик, В. О., & Мироненко, О. С. (2018). Пристрій сиреного типу зі шкідників рослин, наприклад колорадського жука: пат. України № 123017. 12.02.2018. Бюл. № 3.
37. Писаренко, Г. С., Квітка, О. Л., & Уманський, Е. С. (2004). Опір матеріалів: підручник (2-ге вид., доп. і перероб.). Київ: Вища школа. 655 с.
38. Сокол, Г. І. (2007). Визначення динамічних характеристик тіл комах під впливом вібраційних навантажень. У *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла*: зб. наук. праць, 116–124. Дніпро: Наука і освіта.
39. Сокол, Г. І., Алексеєнко, С. В., & Снобко, Д. О. (2023). Вимірювальний пристрій деформацій личинки колорадського хруща: пат. України № 153662. 09.08.2023. Бюл. № 32.
40. Sokol, G. I., Savchuk, T. I., Rybalka, T. A., & Babich, A. C. (2018). Experimental modelling of mechanical characteristics in living elastic bodies with acoustic wave action. *MOJ Applied Bionics and Biomechanics*, 2(4), 238–240. <https://doi.org/10.15406/mojabb.2018.02.0073>
41. Sokol, G. I., Savchuk, T. L., & Snobko, D. S. (2021). Experimental modeling of mechanical characteristics in living elastic bodies. *New Visions in Science and Technology*, 10, 91–95. <https://doi.org/10.9734/bpi/nvst/v10/1973C>
42. Пристрій визначення деформації клейковини (пат. SU 213408 A1).

Received 24.01.2026.

Accepted 28.01.2026.

Methods of calculation and experimental research of mechanical characteristics of living larvae bodies in the destruction of pests by acoustic means

*The paper focuses on the advancement of experimental and analytical methodologies for examining the mechanical properties of living larvae of *Leptinotarsa decemlineata* (Colorado potato beetle) to facilitate their eradication through acoustic resonance. The significance of this research is underscored by the necessity to substitute chemical pest control methods, which are detrimental to human health and the environment, with ecological acoustic technologies. This research is conducted within the domains of applied mechanics and biomechanics, building upon prior investigations into the acoustic eradication of detrimental insects.*

The examination of contemporary scientific literature reveals that low-frequency acoustic and vibrational phenomena exert both detrimental and beneficial effects on biological tissues. Research conducted by V. S. Didkovskiy, V. T. Hrynchenko, G. I. Sokol, and others validates that resonance phenomena in biological structures can induce structural disruption when the external frequency aligns with the organism's natural frequency. The authors suggest using controlled acoustic waves to kill pest larvae by taking advantage of their biomechanical resonance.

To implement this concept, the authors devised a novel methodology for assessing the mechanical properties of living larvae, encompassing stiffness, mass, and Young's modulus. The larvae were represented as cylindrical elastic entities with a uniform cross-section. A new measuring tool was created and patented (Patent of Ukraine No. 153662, 2023) for testing deformation in a controlled way with known loads. The setup has a micrometer, a ma-

nometer, and a loading mechanism that can be changed to measure deformation in living biological specimens very accurately.

The experimental results indicated stiffness values between 0.3248 N/m and 1.1621 N/m, Young's modulus ranging from 36.62 Pa to 79.07 Pa, and natural resonance frequencies from 5.23 Hz to 8.54 Hz. These results show that it is possible to get destructive resonance with acoustic emitters set to these frequencies.

The developed methodologies and instrumentation establish a basis for the design of effective acoustic devices for pest management. The use of these kinds of systems will make it possible to get rid of pests in agriculture in a way that is safe for the environment and doesn't use chemicals. This will greatly lower ecological risks and make sure that crops are protected in a way that is sustainable.

Keywords: living bodies, mechanical characteristics, Colorado potato beetle larvae, device, experimental research, acoustic influence, destruction.

Сокол Галина Іванівна – д.т.н., професор, Дніпропетровський національний університет ім.Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6183-9155>

Снобко Данило Олегович – аспірант, Дніпропетровський національний університет ім.Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8414-8825>

Sokol Galyna Ivanivna - Doctor of Technical Sciences, professor, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6183-9155>

Snobko Danylo Olehovich - Postgraduate student, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8414-8825>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЛАСИФІКАЦІЇ АУДІОФАЙЛІВ

Анотація. Інтенсивне збільшення обсягу цифрових музичних даних актуалізує питання їх структуризації з метою полегшення доступу для користувачів. Жанрова класифікація є одним із ефективних засобів організації музичних творів, що сприяє персоналізованому вибору композицій і генерації релевантних рекомендацій. Метою даного дослідження є аналіз ефективності поєднання різних аудіоознак для реалізації жанрової класифікації із застосуванням багатопараметричного перцептрона та визначення шляхів покращення точності розпізнавання. Розглянуто методи розрахунку часових і частотних акустичних характеристик, реалізовано автоматичний підбір гіперпараметрів за допомогою бібліотеки Optuna, проведено навчання і тестування моделі на основі датасету GTZAN. Запропоновано механізм покращення якості класифікації шляхом додаткової обробки результатів передбачення нейромережі за допомогою методів жорсткого, м'якого та рангового голосування за методом Борда. Отримані результати демонструють істотне підвищення точності класифікації у порівнянні з базовими підходами.

Ключові слова: штучний інтелект, нейронні мережі, машинне навчання, інтелектуальна система, розв'язок задачі класифікації, метрики якості розпізнавання, оптимізація параметрів моделі, методи ансамблевого голосування, аудіоознаки, музичні жанри.

Постановка проблеми. Стрімке зростання обсягу цифрових музичних композицій суттєво ускладнює задачу ефективного використання цього величезного масиву культурного надбання людства. Музичні сервіси повинні не тільки забезпечувати багатопараметричний пошук, надаючи можливість користувачам обирати улюблені композиції. Вкрай важливою функцією музичних платформ є збагачення музичного досвіду слухачів шляхом представлення нових творів для ознайомлення. При цьому система підбірки контенту має не просто пропонувати прослухати найбільш популярні твори, що користуються попитом у багатьох користувачів. Не варто також вдаватись і до просування менш популярних з метою підвищення їх рейтингу. Якісна рекомендаційна система залучає індивідуальні смаки кожного окремого користувача, пропонуючи саме ті твори, які з високою вірогідністю будуть позитивно сприйняті. Для цього важливо брати до уваги як персональну історію прослуховування, так і перелік композицій, які подобаються іншим користувачам зі схожими музичними смаками. Одним із поширених підходів до вирішення цих проблем є жанрова класифікація. Вона забезпечує можливість структурувати масив музичної інформації для зручного доступу, що дає змогу

слухачам обирати твори відповідно до їх індивідуальних музичних вподобань. Крім того, жанровий поділ створює умови для формування персоніфікованих профілів смаків всіх користувачів для надання персоналізованих рекомендацій щодо нових композицій, враховуючи особисті музичні переваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розв'язання задач жанрової класифікації активно застосовуються сучасні засоби штучного інтелекту. Серед численних підходів машинного навчання особливої популярності набули різні архітектури штучних нейронних мереж, тренування яких здійснюється на основі різноманітних аудіоознак та їхніх комбінацій.

Результативність навчання багатосарового перцептрона (MLP), рекурентних нейронних мереж (RNN) та згорткових нейронних мереж (CNN) на основі мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCCs) має важливе значення для підвищення точності автоматичної класифікації аудіоданих [1]. Для зазначених архітектур продемонстровано досягнення точності на тестовій вибірці 60 %, 67 % та 74 %.

Вибір функції активації істотно впливає на процес тренування нейронної мережі. Розглянувши ефективність застосування наступних функцій активації: Sigmoid, Tanh, ReLU, Leaky ReLU, ELU при навчанні MLP, RNN та CNN, виявлено, що найкращі результати спостерігаються при використанні Leaky ReLU, забезпечуючи точність 56 %, 66 % та 74 % для MLP, RNN та CNN відповідно [2]. Така продуктивність пояснюється здатністю Leaky ReLU зберігати від'ємні значення градієнта, масштабуючи їх із малим коефіцієнтом, на відміну від ReLU, яка повністю їх занулює.

Комбінована архітектура CNN+RNN, навчання якої здійснювалося на основі трьох типів спектрограм: звичайної спектрограми, отриманої в результаті застосування короткочасного перетворення Фур'є (STFT); мел-спектрограми, яка формується шляхом масштабування частот STFT за мел-шкалою, що моделює особливості акустичного сприйняття людини; CQT-спектрограми (Constant-Q Transform), яка забезпечує адаптивний розмір частотних бінів завдяки використанню постійного коефіцієнта Q, продемонструвала близькі значення точності класифікації на рівні 85 % при використанні спектрограм STFT та CQT [3].

Застосувавши у якості вхідних даних два типи аудіоознак: MFCCs та мел-спектрограм для навчання чотирьох комбінованих архітектур: CNN+LSTM (мережа з довготривалою короткочасною пам'яттю), CNN+BiLSTM (двонаправлений варіант LSTM), CNN+GRU (керована рекурентна одиниця, спрощений варіант LSTM), та CNN+BiGRU (двонаправлена модифікація GRU), було встановлено, що найвищу ефективність продемонструвала архітектура CNN+BiGRU, забезпечивши точність 76 % при використанні MFCCs та 89 % – при використанні мел-спектрограм [4].

Мета дослідження. Проаналізувати ефективність поєднання різних видів аудіоознак для реалізації жанрової класифікації аудіофайлів із застосуванням багатосарового перцептрона та визначити шляхи покращення точності розпізнавання.

Основний матеріал дослідження. Для досягнення мети було розроблено програмне забезпечення мовою Python, залучаючи фреймворк PyTorch для створення мо-

делей нейронних мереж, бібліотеки Scikit-learn для розрахунку статистичних метрик та Matplotlib для графічної візуалізації процесу тренування та результатів класифікації.

Архітектурним рішенням для нейронної мережі обрано багатошаровий перцептрон (MLP) [5], у якому на прихованих шарах використано активаційну функцію PReLU (Parametric ReLU), основною перевагою якої є не лише збереження від'ємного градієнта, а й можливість автоматичного налаштування параметра масштабування негативної частини функції під час навчання нейронної мережі.

Для обчислення вихідних значень 10 нейронів вихідного шару використовується функція Softmax, яка повертає ймовірності належності до кожного з 10 класів [6]. У ролі функції втрат застосовується категоріальна крос-ентропія [7].

У якості вхідних даних було використано датасет GTZAN [8], який містить 1000 аудіофрагментів тривалістю 30 секунд. Вони рівномірно розподілені серед 10 наступних класів: 9 популярних жанрів (блюз, кантрі, диско, хіп-хоп, джаз, метал, поп, реггі, рок) та окрема категорія класичної музики, що поєднує низку академічних жанрів (симфонію, концерт, сонату тощо). Хоча з часів античності створено колосальну кількість класичних музичних творів, проте модель навчається і використовується лише на обмеженому наборі поширених класичних поліфонічних композицій, що представлені в електронних базах даних. Усі файли збережено у форматі WAV (моно, частота дискретизації 22050 Hz, розрядність 16 bit).

Для кожного фрагмента обчислено наступний набір ознак як на рівні всього 30-секундного запису, так і за його поділом на десять 3-секундних сегментів:

– **Chroma Features** – хроматичні ознаки, або хрома-функції, відображають енергетичний розподіл частот аудіосигналу в межах октав, групуючи їх за висотою звуку (хроматичністю). Оскільки стандартна шкала частот має логарифмічну структуру, частоти, що відрізняються на октаву (наприклад, 220 Гц, 440 Гц, 880 Гц), сприймаються людським вухом як однакові ноти. Хрома-функції представляють спектральну енергію у вигляді 12-бінного вектора, де кожен бін відповідає одному з 12 півтонів музичної гами, незалежно від октави.

– **Root Mean Square Energy (RMSE)** – середньоквадратична енергія – є мірою загальної потужності або інтенсивності сигналу:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

де N – загальна кількість точок у сигналі, x_i – амплітуда сигналу в момент часу i .

– **Spectral Centroid (SC)** – спектральний центроїд – характеризує центр мас спектра сигналу, визначаючи середню частоту, зважену за амплітудами, і відображає розподіл енергії в спектрі:

$$SC = \frac{\sum_{n=1}^N f_n |X(f_n)|}{\sum_{n=1}^N |X(f_n)|} \quad (2)$$

де N – кількість частотних бінів, f_n – частота n -го біну спектра, $|X(f_n)|$ – амплітуда спектра на частоті f_n .

– **Spectral Bandwidth (SB)** – ширина спектра – є мірою розподілу частот у спектрі сигналу, оцінює, наскільки амплітуди частот відхиляються від середнього значення спектра:

$$SB = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (f_n - SC)^2 |X(f_n)|^2}{\sum_{n=1}^N |X(f_n)|^2}} \quad (3)$$

де N – кількість частотних бінів, f_n – частота n -го біну спектра, $|X(f_n)|$ – амплітуда спектра на частоті f_n , SC – спектральний центроїд.

– **Spectral Rolloff** – спектральний ролоф – це параметр, що визначає частоту, нижче якої сконцентрований заданий відсоток (наприклад, 85%) загальної енергії спектра звукового сигналу:

$$Rolloff = \min\{f_n \mid \sum_{k=1}^n |X(f_k)|^2 \geq \alpha \sum_{k=1}^N |X(f_k)|^2\} \quad (4)$$

де N – кількість частотних бінів, f_n – частота n -го біну спектра, $|X(f_k)|$ – амплітуда спектра на частоті f_k , α – порогове значення (зазвичай вибирають $\alpha=0.85$), n – номер біну спектра, до якого накопичена певна частка сумарної потужності спектра, що відповідає обраному пороговому значенню α .

– **Zero Crossing Rate (ZCR)** – частота перетину нуля – це характеристика аудіо-сигналу, що визначає кількість змін знаку сигналу (перетинів нульової осі) за одиницю часу.

– **Harmonic Component (HC)** – гармонійна складова – це частина сигналу, що характеризується тривалими, плавними гармонічними звуками, типовими для мелодичних та гармонічних інструментів (наприклад, вокал, струнні або духові інструменти). Визначається шляхом застосування медіанного фільтра вздовж часової осі.

– **Percussive Component (PF)** – перкусивна складова – це частина сигналу, що містить короткі, різкі звуки, типові для ударних інструментів (наприклад, барабани, хай-хети тощо). Розраховується за допомогою медіанного фільтра вздовж частотної осі.

– **Tempo (BPM – beats per minute)** – темп (швидкість ударів за хвилину) – показник, що вимірює швидкість виконання музичного твору та характеризує його ритмічний і динамічний характер.

– **Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs)** – мел-частотні кепстральні коефіцієнти – це набір коефіцієнтів, які моделюють тембральні характеристики аудіо-сигналу [9]. Для аналізу розраховано перші 20 коефіцієнтів.

Для кожної з перелічених ознак, за винятком темпу, були обчислені середнє значення та дисперсія.

Навчання моделі здійснено на векторі ознак розмірністю 57, який містить усі розглянуті аудіоознаки, обчислені для 3-секундних фрагментів композицій. Розподіл даних на навчальний, валідаційний та тестовий набори проведено у співвідношенні 7:1:2 із застосуванням стратифікованої вибірки, що зберігає пропорції класів у кожному наборі, для підвищення узагальнюючої здатності моделі. Важливо зазначити, що всі 10 фрагментів одного музичного твору повинні належати до одного й того ж набору, аби уникнути «витоку інформації» між навчальним і тестовим наборами. Порушення цього принципу призведе до того, що модель тестуватиметься на даних, які частково вона вже бачила під час тренування, що спотворює оцінку її узагальнюючої здатності.

Оцінювання якості моделі виконано за такими показниками: точність (accuracy), влучність (precision), повнота (recall), F1-метрика (F1-score) та матриця помилок (confusion matrix).

Для автоматизованого підбору гіперпараметрів було використано модуль Optuna, який реалізує не лише випадковий пошук або перебір за фіксованим сітковим планом, а застосовує інтелектуальну стратегію оптимізації на основі байєсівського підходу – зокрема, методу TPE (Tree-structured Parzen Estimator) – оцінювач Парзена, що використовує деревоподібну структуру оцінки розподілу ймовірностей.

Для надання моделі гнучкості було реалізовано динамічну архітектуру багатошарового перцептрона, яка дозволяє змінювати кількість прихованих шарів і нейронів у кожному з них. Здійснено 100 експериментів із варіюванням наступних гіперпараметрів: кількість прихованих шарів – від 1 до 5, кількість нейронів у кожному прихованому шарі – від 16 до 128, коефіцієнт навчання – у діапазоні від 0.00001 до 0.01, кількість епох – від 10 до 50.

На рисунку 1 наведено значення функції втрат і точності моделі для кожного з проведених експериментів.

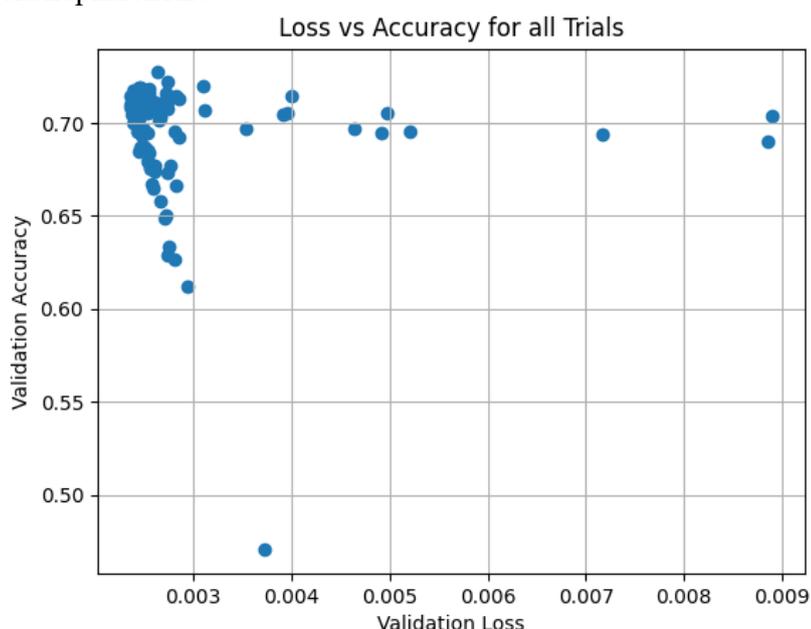


Рисунок 1 – Значення функції втрат і точності моделі на кожному з етапів підбору гіперпараметрів модулем Optuna

Отримано такі оптимальні гіперпараметри нейронної мережі: кількість нейронів у двох прихованих шарах – (101, 128), крок навчання – 0.00068, кількість епох – 43.

На рисунку 2 представлено архітектуру моделі, сформовану відповідно до підібраних параметрів.

Layer (type:depth-idx)	Input Shape	Output Shape	Param #
Sequential	[1, 57]	[1, 10]	--
└Linear: 1-1	[1, 57]	[1, 101]	5,858
└BatchNorm1d: 1-2	[1, 101]	[1, 101]	202
└PReLU: 1-3	[1, 101]	[1, 101]	1
└Linear: 1-4	[1, 101]	[1, 128]	13,056
└BatchNorm1d: 1-5	[1, 128]	[1, 128]	256
└PReLU: 1-6	[1, 128]	[1, 128]	1
└Linear: 1-7	[1, 128]	[1, 10]	1,290

Total params: 20,664
 Trainable params: 20,664
 Non-trainable params: 0
 Total mult-adds (Units.MEGABYTES): 0.02

Input size (MB): 0.00
 Forward/backward pass size (MB): 0.01
 Params size (MB): 0.08
 Estimated Total Size (MB): 0.09

Рисунок 2 – Архітектура нейромережі з підібраними оптимальними параметрами

На рисунку 3 відображено зміни значень функції втрат і точності для тренувальної та валідаційної вибірок у процесі навчання моделі.



Рисунок 3 – Динаміка зміни функції втрат і точності під час тренування мережі

Як видно з графіка, після 21 епохи спостерігається значне зростання функції втрат на валідаційній вибірці, що свідчить про початок перенавчання моделі. Тому доцільно зупинити навчання саме на цій епосі для уникнення вказаного ефекту.

На рисунку 4 наведено результати класифікації навченою моделлю для 3-секундних фрагментів аудіо.

Для агрегування результатів 10 передбачень нейронної мережі по кожному музичному твору застосовувалися наступні методи ансамблевого голосування:

– **Hard Voting (жорстке голосування)** – кожен класифікатор робить окремий прогноз, а остаточне рішення приймається на основі більшості голосів.

– **Soft Voting (м'яке голосування)** – враховуються ймовірності належності зразка до кожного класу, що генеруються класифікаторами; підсумовуються ймовірності для кожного класу, після чого обирається клас із найбільшою сумарною ймовірністю [10].

– **Borda Count (метод Борда)** – специфічний вид рангового голосування, у якому кожному класу призначаються бали залежно від його позиції у ранжованому списку кожного класифікатора. Клас із найбільшою сумою балів від усіх класифікаторів обирається як остаточний прогноз [11].

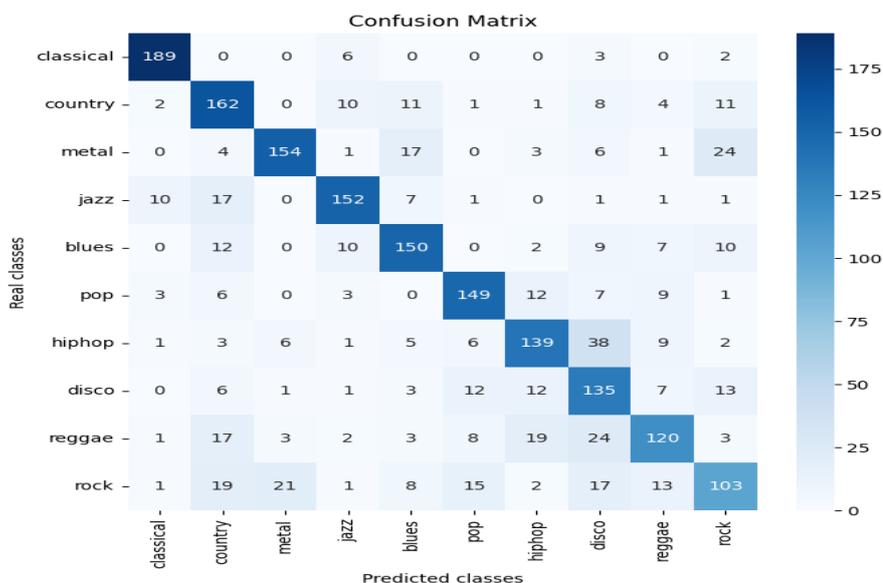


Рисунок 4 – Матриця помилок класифікації нейронної мережі

Рисунок 5 ілюструє розподіл коректних та некоректних передбачень, отриманих методом голосування Борда для кожного класу окремо. Твори класичної музики та жанру кантрі були класифіковані з високою точністю, тоді як точність класифікації жанрів рок, реггі та хіп-хоп виявилась нижчою, що може бути пояснено їх більшою варіативністю.

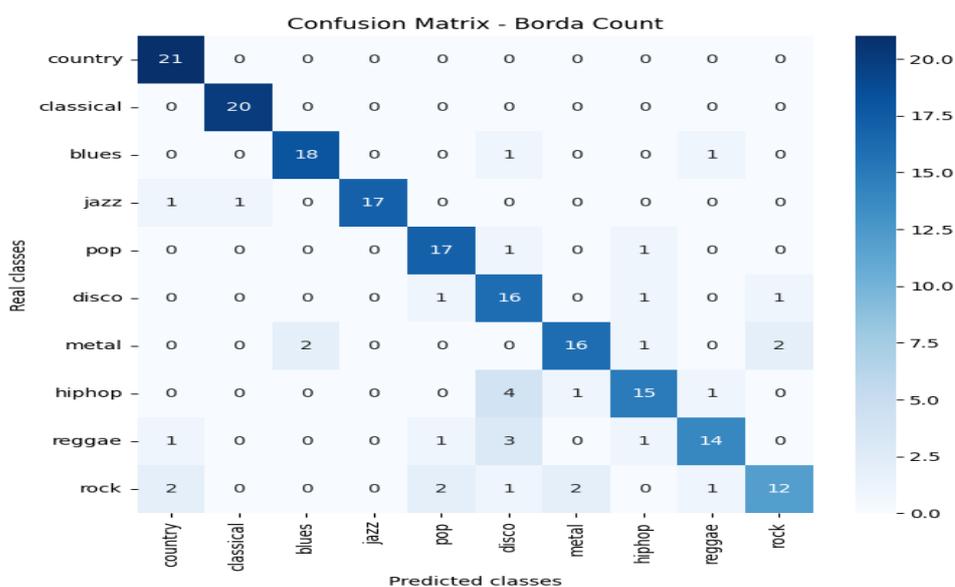


Рисунок 5 – Матриця помилок голосування методом Борда

У таблиці 1 наведені метрики якості передбачень як безпосередньо для багатошарового перцептронну (MLP), так і для поєднань його результатів із відповідними методами ансамблевого голосування.

Таблиця 1

Метрики якості передбачень моделей

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
MLP	72.7%	73.2%	72.7%	72.7%
MLP + Hard Voting	81%	81.7%	81%	80.9%
MLP + Soft Voting	82%	82.6%	82%	81.8%
MLP + Borda Count	83%	83.7%	83%	82.8%

Висновки. У роботі розглянуто методи розрахунку часових та частотних аудіоознак і встановлено, що поєднання навіть невеликої кількості таких ознак із використанням лише їх середніх значень та дисперсій у якості вхідних даних для тренування нейромережі забезпечує досить високі результати жанрової класифікації. Це досягається навіть при застосуванні відносно простої архітектури нейронної мережі – перцептронну з двома прихованими шарами та невеликою кількістю нейронів у них. Автоматичний підбір гіперпараметрів мережі здійснено за допомогою модуля Optuna, після чого проведено навчання та тестування моделі на наборі музичних даних GTZAN. Поділ 30-секундних музичних уривків на 10 частин для тренування нейромережі, а також подальше об'єднання передбачень для кожного фрагмента з використанням методів жорсткого, м'якого голосування та рангового голосування методом Борда дозволили суттєво підвищити точність класифікації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jain S., Yadav S., Prabir P., Sundar S. Music information retrieval and classification using deep learning. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 06 June 2021, Vol. 08, P. 1059-1066.
2. Hu Y., Mogos G. Music genres classification by deep learning. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, [S.l.] , February 2022, Vol. 25, No. 2, P. 1186-1198. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v25.i2.pp1186-1198>
3. Umale A., Mehul, Bhandw P., Bagwan S., Patil S.M. Music genre classification. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT), 13 May 2023, Vol. 3, P. 414-425.
4. Ashraf M., Abid F., Din I.U., Rasheed J., Yesiltepe M., Yeo S.F., Ersoy M.T. A Hybrid CNN and RNN variant model for music classification. Applied Sciences, 2023, 13(3), 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031476>
5. Ткаліченко С.В. Штучні нейронні мережі: навч. посіб. Кривий Ріг: Державний університет економіки і технологій, 2023. 150 с.
6. Субботін С.О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч.посіб. Житомир, 2020.184с.
7. Nielsen M. Neural networks and deep learning. 2013. URL: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>

8. Tzanetakis G., Cook P. Musical genre classification of audio signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, July 2002, Vol. 10, No. 5. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~gtzan/work/pubs/tsap02gtzan.pdf>
9. Zheng J., Oussalah M. Automatic system for music genre classification. 2006. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=342e83b5272b701b225b289e817bb8d92db0fad2>
10. Simic M., Aibin M. Hard vs. soft voting classifiers. 28 February 2025. URL: <https://www.baeldung.com/cs/hard-vs-soft-voting-classifiers>
11. Drotar P., Gazda M., Vokorokos L. Ensemble feature selection using election methods and ranker clustering. *Information Sciences*, 2019, Vol. 480, P. 365-380.

REFERENCES

1. Jain, S., Yadav, S., Prabir, P., & Sundar, S. (2021, June 6). Music information retrieval and classification using deep learning. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 08, P. 1059-1066.
2. Hu, Y., & Mogos, G. (2022, February). Music genres classification by deep learning. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, [S.l.], Vol. 25, No. 2, P. 1186-1198. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v25.i2.pp1186-1198>
3. Umale, A., Mehul, Bhandw, P., Bagwan, S., & Patil, S. M. (2023, May 13). Music genre classification. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, Vol. 3, P. 414-425.
4. Ashraf, M., Abid, F., Din, I.U., Rasheed, J., Yesiltepe, M., Yeo, S.F., & Ersoy, M.T. (2023). A Hybrid CNN and RNN variant model for music classification. *Applied Sciences*, 13(3), 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13031476>
5. Tkalychenko, S.V. (2023). Shtuchni neyronni merezhi [Artificial neural networks]. Kryvyi Rih: Derzhavnyi universytet ekonomiky i tekhnolohii [in Ukrainian].
6. Subbotin, S.O. (2020). Neyronni merezhi: teoriia ta praktyka [Neural networks: theory and practice]. Zhytomyr [in Ukrainian].
7. Nielsen M. (2013). Neural networks and deep learning. URL: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>
8. Tzanetakis, G., & Cook, P. (2002, July). Musical genre classification of audio signals. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 10, No. 5. URL: <https://www.cs.cmu.edu/~gtzan/work/pubs/tsap02gtzan.pdf>
9. Zheng, J., & Oussalah, M. (2006). Automatic system for music genre classification. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=342e83b5272b701b225b289e817bb8d92db0fad2>
10. Simic, M., & Aibin, M. (2025, February 28). Milos Simic, Michal Aibin. Hard vs. soft voting classifiers. URL: <https://www.baeldung.com/cs/hard-vs-soft-voting-classifiers>
11. Drotar, P., Gazda, M., & Vokorokos, L. (2019). Peter Drotar, Matej Gazda, Liberios Vokorokos. Ensemble feature selection using election methods and ranker clustering. *Information Sciences*, Vol. 480, P. 365-380.

Received 23.01.2026.

Accepted 28.01.2026.

Intelligent audio file classification system

The continuously increasing volume of music compositions highlights the need for effective organization to ensure convenient user access. Genre classification is one of the common approaches, enabling listeners to select tracks according to their individual preferences and receive automated recommendations for new content. The literature review of previous studies demonstrated that different types of artificial neural network architectures are used for classification, utilizing various audio features and their combinations for training. Using mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs) as input data revealed the advantages of convolutional neural networks (CNN) over multilayer perceptrons (MLP) and recurrent neural networks (RNN). Evaluating activation functions such as Sigmoid, Tanh, ReLU, Leaky ReLU, ELU on MLP, RNN and CNN showed that Leaky ReLU achieved the best performance due to its ability to retain scaled negative gradients, unlike ReLU, which just zeros them out. A combined CNN+RNN architecture provided great results using MFCCs and spectrograms as input data. This study aims to analyze the effectiveness of combining various types of audio features for genre classification using a multilayer perceptron, as well as to explore methods for improving classification accuracy. Time-domain and frequency-domain audio features were examined. The neural network was trained and tested on the GTZAN dataset, containing 1000 audio samples with duration of 30 seconds, 100 samples for each of 10 genres. The hyperparameters were automatically optimized using the Optuna framework, which applies intelligent search based on Tree-structured Parzen Estimator. Furthermore, a post-processing mechanism based on hard voting, soft voting, and the Borda count method was introduced. Experimental results demonstrate that the proposed ensemble approach significantly enhances the classification accuracy compared to the baseline model.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, machine learning, intelligent system, solving classification task, recognition quality metrics, model parameters optimization, ensemble voting methods, audio features, musical genres.

Сулейманов Євгеній Сагірович – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3942-3099>

Suleymanov Yevgeniy – PhD Student, Department of Software Engineering and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3942-3099>

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В ОБРОБЦІ 3D СЕЙСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. У статті представлено комплексний технічний огляд застосування методів машинного навчання (МН) та глибокого навчання (ГН) для аналізу 3D сейсмічних зображень у геофізичній розвідці. Розглядається проблема обробки терабайтних обсягів сейсмічних даних, які традиційно вимагають місяців ручної інтерпретації, та обґрунтовується необхідність переходу до автоматизованих методів аналізу.

Детально описуються основні архітектури нейронних мереж (CNN, U-Net, TransUnet) та їх застосування для ключових завдань: виявлення розломів, делімітації соляних тіл та класифікації літофацій. Особлива увага приділяється практичним аспектам впровадження МН, включаючи роботу з форматом SEG-Y через Python-бібліотеки, методи подолання дефіциту розмічених даних через синтетичну генерацію та аугментацію, а також використання публічних наборів даних (F3, FORCE) для навчання моделей.

Висвітлюються сучасні напрямки досліджень, зокрема самоконтрольоване навчання (SSL) для роботи з нерозміченими даними, фізико-інформовані нейронні мережі (PINNs) для інтеграції геофізичних законів, та методи квантифікації невизначеності результатів.

Ключові слова: машинне навчання, глибоке навчання, 3D сейсмічні дані, згорткові нейронні мережі, геофізична інтерпретація, виявлення розломів, Python, SEG-Y.

Вступ. Дослідження та характеристика підземної частини Землі є фундаментальними для енергетичного сектору, екологічного моніторингу та оцінки геологічних ризиків. Протягом десятиліть 3D сейсмічна візуалізація була основним інструментом для візуалізації підземних структур, надаючи неоціненні дані для ідентифікації вуглеводневих резервуарів, потенційних місць для секвестрації вуглецю та джерел геотермальної енергії. Ця технологія використовує звукові хвилі для генерації тривимірних об'ємних зображень, або “кубів”, геологічних формацій глибоко під поверхнею. Процес включає збір величезних обсягів сейсмічних даних, які потім піддаються інтенсивній обчислювальній обробці для створення інтерпретованого зображення підземної частини.

Однак, величезний обсяг і складність сучасних сейсмічних наборів даних представляють значні виклики. Одне 3D дослідження може генерувати терабайти даних, роблячи ручну інтерпретацію трудомістким, часозатратним і суб'єктивним процесом. Ця проблема “великих даних” довела традиційні методи інтерпретації до їх меж, створюючи попит на більш ефективні, об'єктивні та потужні аналітичні інструменти.

У відповідь, галузь геофізики зазнає цифрової трансформації, все більше інтегруючи методи машинного навчання (МН) та глибокого навчання (ГН) у робочі процеси сейсмічного аналізу. Ці технології пропонують нову парадигму, переходячи від ручної, гіпотезо-орієнтованої інтерпретації до автоматизованого, даних-орієнтованого розпізнавання шаблонів. Алгоритми МН можуть аналізувати величезні, багатоатрибутні набори даних для ідентифікації тонких геологічних особливостей, автоматизувати повторювані завдання, такі як виділення розломів, і забезпечувати більш повторювані та об'єктивні результати. Цей звіт надає комплексний огляд застосування машинного навчання до 3D сейсмічних даних, детально описуючи методології, експерименти, результати та майбутні напрямки цієї швидко розвиваючої галузі.

Пов'язані роботи. Застосування машинного навчання в сейсмічній розвідці зросло експоненціально, з алгоритмами, що впроваджуються практично на кожному етапі робочого процесу обробки та інтерпретації. Літературний аналіз публікацій з основних геонаукових репозиторіїв, таких як SEG та EAGE, показує, що впровадження МН в основному зосереджені на автоматизації окремих завдань для скорочення часу обробки та покращення ефективності та результатів.

Для сейсмічної інтерпретації основними цілями для застосування МН є виявлення розломів, класифікація літофацій та ідентифікація геотіл, таких як соляні куполи.

Виявлення розломів: Це завдання є критичним для розуміння структурних пасток і міграції флюїдів, але традиційно є одним з найбільш часозатратних аспектів ручної інтерпретації. Глибоке навчання, особливо з використанням згорткових нейронних мереж (CNN) та архітектур U-Net, виявилось дуже ефективним і результативним. Ці методи формулюють ідентифікацію розломів як проблему сегментації зображення, класифікуючи кожен воксель як розлом або не-розлом. Дослідження показують, що підходи на основі CNN можуть виробляти чистіші, більш послідовні результати за години, порівняно з місяцями, необхідними для ручного виділення. Останні роботи досліджували передові архітектури, такі як TransUnet та Dual U-Net, щоб краще захоплювати як локальні, так і глобальні особливості розломів.

Делімітація геотіл і солі: Ідентифікація соляних тіл є критичною в багатьох нафтових басейнах, але складною через погане сейсмічне зображення на їх межах. CNN та моделі U-Net були успішно застосовані для сегментації цих складних структур, часто перевершуючи традиційні методи, базовані на атрибутах, шляхом навчання особливостей безпосередньо з сирих сейсмічних даних амплітуди.

Класифікація літофацій і стратиграфії: Це включає ідентифікацію різних типів порід і осадових середовищ з сейсмічних шаблонів. Використовуються як контрольовані, так і неконтрольовані методи навчання. Неконтрольовані робочі процеси, часто поєднуючи аналіз головних компонентів (PCA) для зменшення розмірності та самоорганізуючі карти (SOM) для кластеризації, є потужними для дослідницького аналізу в областях з обмеженими даними. Контрольовані методи, включаючи різні архітектури CNN, використовуються, коли доступні дані свердловин для маркування, дозволяючи безпосереднє прогнозування розподілу фацій по всьому сейсмічному об'єму.

Незважаючи на ці успіхи, залишаються значні виклики. Дефіцит розмічених даних істинних значень є основним вузьким місцем для контрольованого навчання. Крім того, моделі МН часто борються з узагальнюваністю, де модель, навчена на одному наборі даних, погано працює на іншому з різного геологічного середовища. Це стимулювало дослідження в нових областях, таких як самоконтрольоване навчання (SSL) для навчання з нерозмічених даних, фізико-інформовані нейронні мережі (PINNs) для інтеграції фізичних законів у моделі, та квантифікація невизначеності (UQ) для оцінки довіри моделі.

Цілі дослідження. Основною метою цього звіту є надання структурованого та комплексного аналізу застосування та розробки алгоритмів машинного навчання для роботи з 3D сейсмічними зображеннями. Ключові цілі дослідження:

Огляд сучасного стану: Систематично дослідити та синтезувати поточний ландшафт застосувань МН в сейсмічній інтерпретації, спираючись на академічну літературу та промислові практики для ідентифікації ключових тенденцій, домінуючих методологій і встановлених еталонів.

Деталізація основних методологій: Надати поглиблене пояснення основних архітектур МН і робочих процесів, використовуваних для фундаментальних завдань інтерпретації, включаючи делімітацію систем розломів, ідентифікацію соляних тіл і стратиграфічну класифікацію фацій.

Окреслити практичний робочий процес МН: Описати наскрізний процес застосування МН до сейсмічних даних, покриваючи критичні кроки, такі як надходження та обробка даних, стратегії створення навчальних даних для подолання вузького місця анотації, та використання публічних наборів даних для експериментування та валідації моделей.

Ідентифікувати та обговорити ключові виклики та майбутні напрямки: Проаналізувати основні перешкоди, що заважають широкому впровадженню та надійності МН в цій області, такі як узагальнюваність моделей та потреба в квантифікації невизначеності. Дослідити межі досліджень, включаючи фізико-інформоване та самоконтрольоване навчання, що має на меті вирішити ці виклики та визначити майбутнє інтелектуальної сейсмічної інтерпретації.

Методологія. Методології застосування машинного навчання до 3D сейсмічних даних охоплюють обробку даних, створення навчальних даних та впровадження специфічних моделей навчання, адаптованих для завдань геологічної інтерпретації.

Обробка та підготовка даних. Стандартним форматом для сейсмічних даних є SEG-Y, який може бути незручним для фреймворків МН. Екосистема Python пропонує бібліотеки з відкритим кодом, такі як `segyio` для ефективного, низькорівневого читання та запису, та `segysak`, який використовує `hdf5` та `dask` для високорівневої, масштабованої маніпуляції даними на наборах даних, які занадто великі для розміщення в пам'яті.

Типовий робочий процес починається з підготовки даних, яка включає очищення, нормалізацію та інженерію ознак. Для багатоатрибутного аналізу загальним першим

кроком є генерація десятків сейсмічних атрибутів (наприклад, амплітуда, частота, когерентність), призначених для підкреслення специфічних геологічних особливостей. Для управління цими високорозмірними даними часто використовується аналіз головних компонентів (РСА) для зменшення розмірності та вибору найбільш інформативних, некорельованих атрибутів для входу моделі.

Анотація навчальних даних. Контрольоване навчання, найпотужніша парадигма для багатьох завдань, сильно обмежене дефіцитом розмічених даних. Використовується кілька стратегій для подолання цього “вузького місця анотації”:

- Ручне та AI-асистоване маркування: Експерт вручну маркує особливості, процес, який є повільним, але забезпечує високоякісні дані. Для прискорення цього AI-асистовані інструменти можуть пропонувати початкові позначки для уточнення експертом-людиною, створюючи робочий процес “людина в циклі”.

- Генерація синтетичних даних: Потужною альтернативою є створення 3D геологічних моделей з ідеально відомими особливостями (наприклад, розломи) і потім використання прямого моделювання для симуляції відповідних сейсмічних даних. Це генерує необмежені, ідеально розмічені синтетичні дані для навчання моделей.

- Збільшення даних: Це включає створення нових навчальних зразків шляхом застосування трансформацій до існуючих даних, таких як додавання шуму або зсув даних, що змушує модель вивчати більш стійкі особливості та покращує узагальнення. Генеративні змагальні мережі (GANs) є передовою технікою, використовуваною для генерації нових, реалістичних синтетичних сейсмічних хвильових форм на основі статистичних характеристик реальних даних, додатково збагачуючи навчальний набір.

Моделі машинного навчання. Специфічні архітектури МН виявилися особливо ефективними для завдань сейсмічної інтерпретації.

U-Net для сегментації розломів і солі: Архітектура U-Net, первинно з біомедичної візуалізації, є сучасним стандартом для завдань семантичної сегментації, таких як делімітація розломів і солі. Її структура кодер-декодер з “пропускними з’єднаннями” дозволяє їй захоплювати особливості на кількох масштабах, поєднуючи широку контекстну інформацію з точними просторовими деталями для створення гострих, точних меж сегментації. Варіанти, такі як TransUnet, інтегрують блоки Transformer для кращого захоплення далекосяжних залежностей та покращення континуальності прогнозованих розломів.

CNN для класифікації фацій і солі: Згорткові нейронні мережі (CNN) є дуже ефективними для завдань класифікації. У загальному підході CNN навчається на невеликих 3D патчах сейсмічних даних для класифікації центрального вокселя (наприклад, як ‘сіль’ або специфічний тип фацій). Цей наскрізний метод дозволяє мережі автоматично вивчати оптимальні дискримінативні особливості безпосередньо з сирих сейсмічних даних амплітуди, уникаючи упередженого ручного вибору атрибутів. Більш передові моделі кодер-декодер можуть класифікувати цілі сейсмічні секції відразу.

Неконтрольована кластеризація (PCA та SOM): Для аналізу сейсмічних фацій в областях з обмеженими даними свердловин поширений неконтрольований робочий процес. Після використання PCA для вибору ключових атрибутів використовується са-

моорганізує карта (SOM) для кластеризації. SOM є неконтрольованою нейронною мережею, яка відображає високорозмірні дані атрибутів на 2D сітку, де різні кластери представляють окремі сейсмічні фації, геологічне значення яких потім інтерпретується геовченим.

Експерименти. Розробка та валідація згаданих методологій спираються на стандартизовані експерименти з використанням публічно доступних еталонних наборів даних. Ці набори даних є критичними для забезпечення об'єктивного порівняння між різними моделями та сприяння відтворюваних досліджень. Ключові портали для цих ресурсів включають репозиторій TerraNubis та урядові джерела, такі як Геологічна служба США (USGS).

Набір даних Нідерландського блоку F3. Одним з найбільш широко використовуваних публічних наборів даних для досліджень МН є Нідерландський блок F3, розташований на морі в Північному морі. Це 3D сейсмічне дослідження відоме своїм високоякісним зображенням різноманітних геологічних особливостей, включаючи:

- Великомасштабні сигмоїдальні кліноформи з великої дельтової системи.
- Окремі сейсмічні фації, канали та піщані хвилі.
- Аномалії, такі як газові димарі та яскраві плями від біогенного газу.
- Глибокий соляний купол Цехштейн та різні системи розломів.

Набір даних, наданий як проект OpendTest, включає 3D сейсмічний об'єм, численні похідні об'єми атрибутів, інтерпретовані горизонти та дані каротажу з чотирьох свердловин. Ця багата комбінація робить його ідеальним випробувальним стендом для широкого спектру експериментів МН, від неконтрольованої класифікації фацій до контрольованої сегментації соляних тіл.

Набір даних конкурсу FORCE 2020 ML. Для специфічного тестування стійкості та узагальнюваності алгоритмів виявлення розломів норвезький консорціум FORCE організував конкурс машинного навчання в 2020 році. Наданий набір даних складається з двох 3D сейсмічних досліджень з Північно-Західного шельфу Австралії:

- Навчальні дані: Дослідження поля Іхтіос разом з деякими синтетичними позначками розломів.
- Сліпі тестові дані: Сусіднє дослідження Адель.

Геологія характеризується добре вираженою полігональною системою розломів у більш поверхневих секціях та більш складною, дифузною системою розломів у більш глибокій юрській секції. Конкурс мав на меті оцінити, наскільки добре моделі МН, часто навчені на чистих синтетичних даних, можуть працювати на “не дуже ідеальних” реальних даних зі складними патернами розломовування, роблячи його критичним еталоном для узагальнюваності.

Результати та обговорення. Застосування методологій машинного навчання до сейсмічних наборів даних дало трансформативні результати, водночас підкресливши значні виклики та області для майбутніх досліджень.

Продуктивність та досягнення автоматизації. Моделі МН послідовно демонстрували здатність автоматизувати завдання інтерпретації зі значними здобутками в

швидкості та об'єктивності порівняно з ручними методами. Для виявлення розломів модель глибокого навчання може делімітувати цілу мережу розломів у 3D об'ємі за години, завдання, яке зайняло б у експерта-людини місяці. Результати є не лише швидшими, але й більш повторюваними та менш схильними до упередженості окремого інтерпретатора. У класифікації фацій неконтрольовані методи, такі як SOM, можуть швидко аналізувати десятки атрибутів одночасно, виявляючи тонкі шаблони та геологічні тенденції, які є непомітними для людського ока.³¹ Контрольовані CNN, коли навчені на даних свердловин, можуть точно прогнозувати 3D розподіл літофацій, забезпечуючи детальні моделі резервуарів. Ці автоматизовані робочі процеси звільняють геовчених від нудних ручних завдань, дозволяючи їм зосередитися на аналізі та прийнятті рішень вищого рівня.

Ключові виклики та майбутні напрямки. Незважаючи на ці успіхи, залишається кілька фундаментальних викликів, що визначають межі поточних досліджень.

Узагальнюваність: Основною слабкістю багатьох моделей глибокого навчання є їх неспроможність узагальнити з одного сейсмічного дослідження на інше. Модель може вивчити особливості, специфічні для шуму або параметрів збору її навчальних даних, що призводить до поганої продуктивності на нових даних. Вирішення цього потребує розробки більш стійких моделей через техніки, такі як трансферне навчання та агресивне збільшення даних.

Фізико-інформоване машинне навчання: Для покращення узагальнюваності та вирішення природи “чорної скриньки” чисто даних-орієнтованих моделей дослідники розробляють фізико-інформовані нейронні мережі (PINNs). PINNs інтегрують керуючі фізичні закони, такі як рівняння акустичної хвилі, безпосередньо в функцію втрат моделі. Це обмежує модель до виробництва фізично правдоподібних рішень, покращуючи стійкість, особливо там, де дані розріджені або зашумлені.

Навчання без міток: Дефіцит розмічених даних залишається найбільшою перешкодою для розгортання контрольованого навчання в масштабі.⁴⁰ Самоконтрольоване навчання (SSL) пропонує переконливе рішення, дозволяючи моделям вивчати значущі представлення з величезних обсягів нерозмічених даних. Навчаючись на “претекстовому завданні”, такому як прогнозування замаскованих частин сейсмічного зображення, модель вивчає базову структуру даних, яка потім може бути налаштована для специфічного завдання з дуже невеликою кількістю міток.

Квантифікація невизначеності (UQ): Для рішень розвідки з високими ставками недостатньо однієї детерміністичної передбачення. UQ має на меті квантифікувати довіру моделі до її передбачень. Техніки, такі як байєсівські нейронні мережі або ансамблі моделей, використовуються для оцінки діапазону можливих результатів, розрізняючи невизначеність від зашумлених даних (алеаторну) та невизначеність від самої моделі (епістемічну). Результуючі карти ймовірності є набагато більш цінними для прийняття рішень на основі ризику, ніж одна інтерпретація.

Висновок. Інтеграція машинного навчання в аналіз 3D сейсмічних зображень означає ключову еволюцію в дослідженні земної підповерхні. Цей технологічний зсув вирішує властиві обмеження ручної інтерпретації в епоху експоненціально зростаючих

обсягів даних, пропонуючи драматичні покращення в ефективності, об'єктивності та глибині геологічного розуміння. Основні завдання інтерпретації, такі як делімітація розломів, соляних тіл та стратиграфічних фацій, тепер успішно автоматизуються спеціалізованими архітектурами глибокого навчання, такими як U-Nets та CNNs, які послідовно перевершують традиційні методи як за швидкістю, так і за точністю.

Практичне застосування цих моделей підтримується розширюючою екосистемою інструментів з відкритим кодом для обробки даних та публічно доступними еталонними наборами даних, які є необхідними для валідації нових алгоритмів. Однак шлях до широкого впровадження не позбавлений викликів. Критичне вузьке місце дефіциту розмічених даних продовжує стимулювати інновації в областях, таких як генерація синтетичних даних та само контрольоване навчання.

Дивлячись вперед, межа досліджень зосереджена на побудові наступного покоління інтелектуальних інструментів інтерпретації, які є не лише точними, але й стійкими, надійними та заслуговуючи довіри. Ключові напрямки досліджень — покращення узагальнюваності моделей, інтеграція фізичних принципів через PINNs, дозвіл навчання без міток через SSL, та квантифікація довіри моделі з UQ — глибоко взаємопов'язані. Прогрес у цих областях приведе до систем ШІ, які можуть бути розгорнуті більш широко та з більшою впевненістю. Ця триваюча революція продовжуватиме трансформувати роль геовченого, надаючи їм потужні аналітичні інструменти для прийняття більш обґрунтованих, даних-орієнтованих рішень про ресурси та навколишнє середовище Землі.

ЛІТЕРАТУРА

1. 3-D Seismic Interpretation. M. Bacon, R. Simm, T. Redshaw, Cambridge University Press, 2003
2. Fault detection seismic data using graph convolutional network. Patitapaban Palo, Aurobinda Routray, Rahul Mahadik, Sanjai Kumar Singh, The Journal of Supercomputing, 03.2023, DOI:10.1007/s11227-023-05173-8
3. Introduction to Seismic Imaging. Prof. Gerald Gardner, Society of Exploration Geophysicists
4. Discovering hidden hydrocarbons: using seismic-imaging technology to map formations far below the earth's surface. ExxonMobil, 09.2018
5. Introduction to seismic data and processing. Cambridge University Press, Hua-Wei Zhou
6. Solving the challenge of seismic data management. SLB, Victor Aarre
7. Sebai, D., Zouaoui, M. & Ghorbel, F. Seismic data compression: an overview. Multimedia Systems 30, 38 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00530-023-01233-4>
8. Pitfalls and limitations in seismic attribute interpretation of tectonic features. SEG Library, Kurt J. Marfurt, Tiago M. Alves, doi.org/10.1190/INT-2014-0122.1
9. Lappin, M. (2004). 3D Seismic Technology: Are We Realising Its Full Potential?. Geological Society, London, Memoirs. Geological Society of London. doi: 10.1144/GSL.MEM.2004.029.01.01.

10. Machine learning for seismic exploration: Where are we and how far are we from the holy grail?. Farbod Khosro Anjom, Francesco Vaccarino, Laura Valentina Socco, GEOPHYSICS - SEG Library, <https://doi.org/10.1190/geo2023-0129.1>
11. Seismic facies analysis using machine learning. Thilo Wrona, Indranil Pan, Robert L. Gawthorpe, and Haakon Fossen, GEOPHYSICS - SEG Library, <https://doi.org/10.1190/geo2017-0595.1>
12. Unravel Complex Strike-Slip System in Frontier Collision Margin of Banggai-Sula Basin, Eastern Indonesia: A Machine-Learning Augmentation for 3D Seismic Interpretation. Atha Khawarizmy, Fakhriar Naufaldi, Krishna Pratama Laya, Wahyudin Suwarlan, Iswani Waryono, Ghufon Fauzi, OB Pertamina Medco Tomori Ltd, 2 Pi Energy, Badley Geoscience
13. Machine learning for seismic exploration: Where are we and how far are we from the holy grail? Farbod Khosro Anjom, Francesco Vaccarino, Laura Valentina Socco, GeoScience-World, Geophysics, vol. 89, no. 1 (january-february 2024); p. wa157–wa178, 17 figs., 2 tables. [10.1190/geo2023-0129.1](https://doi.org/10.1190/geo2023-0129.1)
14. Seismic Fault Detection using Neural Networks. GeoConvention, Ayda Azad Khorasani, J.Kim Welford, Alison Malcolm, Department of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland, 05.2023
15. Comparing Modern Deep Learning with Traditional Methods for Seismic Fault Interpretation. N. Ngcobo, M. Manzi, G. Nwaila, J. Bourdeau, S. Zhang, European Association of Geoscientists & Engineers, NSG 2024 5th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, Sep 2024, Volume 2024, p.1 – 5, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202420194>
16. Artificial intelligence methods for predicting hydrocarbon deposits from three-dimensional seismic images. I. Dmytriieva; A. Dmytrenko, System technologies, 2025, <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-159-2025-16>

REFERENCES

1. 3-D Seismic Interpretation. M. Bacon, R. Simm, T. Redshaw, Cambridge University Press, 2003
2. Fault detection seismic data using graph convolutional network. Patitapaban Palo, Aurobinda Routray, Rahul Mahadik, Sanjai Kumar Singh, The Journal of Supercomputing, 03.2023, DOI:10.1007/s11227-023-05173-8
3. Introduction to Seismic Imaging. Prof. Gerald Gardner, Society of Exploration Geophysicists
4. Discovering hidden hydrocarbons: using seismic-imaging technology to map formations far below the earth's surface. ExxonMobil, 09.2018
5. Introduction to seismic data and processing. Cambridge University Press, Hua-Wei Zhou
6. Solving the challenge of seismic data management. SLB, Victor Aarre
7. Sebai, D., Zouaoui, M. & Ghorbel, F. Seismic data compression: an overview. Multimedia Systems 30, 38 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00530-023-01233-4>
8. Pitfalls and limitations in seismic attribute interpretation of tectonic features. SEG Library, Kurt J. Marfurt, Tiago M. Alves, doi.org/10.1190/INT-2014-0122.1

9. Lappin, M. (2004). 3D Seismic Technology: Are We Realising Its Full Potential?. Geological Society, London, Memoirs. Geological Society of London. doi: 10.1144/GSL.MEM.2004.029.01.01.
10. Machine learning for seismic exploration: Where are we and how far are we from the holy grail? Farbod Khosro Anjom, Francesco Vaccarino, Laura Valentina Socco, GEOPHYSICS - SEG Library, <https://doi.org/10.1190/geo2023-0129.1>
11. Seismic facies analysis using machine learning. Thilo Wrona, Indranil Pan, Robert L. Gawthorpe, and Haakon Fossen, GEOPHYSICS - SEG Library, <https://doi.org/10.1190/geo2017-0595.1>
12. Unravel Complex Strike-Slip System in Frontier Collision Margin of Banggai-Sula Basin, Eastern Indonesia: A Machine-Learning Augmentation for 3D Seismic Interpretation. Atha Khawarizmy, Fakhriar Naufaldi, Krishna Pratama Laya, Wahyudin Suwarlan, Iswani Waryono, Ghufron Fauzi, OB Pertamina Medco Tomori Ltd, 2 Pi Energy, Badley Geoscience
13. Machine learning for seismic exploration: Where are we and how far are we from the holy grail? Farbod Khosro Anjom, Francesco Vaccarino, Laura Valentina Socco, GeoScience-World, Geophysics, vol. 89, no. 1 (january-february 2024); p. wa157–wa178, 17 figs., 2 tables. [10.1190/geo2023-0129.1](https://doi.org/10.1190/geo2023-0129.1)
14. Seismic Fault Detection using Neural Networks. GeoConvention, Ayda Azad Khorasani, J.Kim Welford, Alison Malcolm, Department of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland, 05.2023
15. Comparing Modern Deep Learning with Traditional Methods for Seismic Fault Interpretation. N. Ngcobo, M. Manzi, G. Nwaila, J. Bourdeau, S. Zhang, European Association of Geoscientists & Engineers, NSG 2024 5th Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, Sep 2024, Volume 2024, p.1 – 5, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202420194>
16. Artificial intelligence methods for predicting hydrocarbon deposits from three-dimensional seismic images. I. Dmytriieva, A. Dmytrenko, System technologies, 2025, <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-159-2025-16>

Received 25.01.2026.
Accepted 29.01.2026.

Application of machine learning methods in the processing of 3D seismic images

This paper presents a comprehensive technical review of machine learning (ML) and deep learning (DL) methods applied to 3D seismic image analysis in geophysical exploration. The exponential growth in seismic data acquisition has created a "big data" challenge where single 3D surveys generate terabytes of complex volumetric data, making traditional manual interpretation increasingly impractical and subjective. This work systematically examines the paradigm shift from hypothesis-driven manual interpretation to data-driven automated pattern recognition, addressing the critical need for more efficient, objective, and repeatable analytical tools in the energy sector, environmental monitoring, and geological risk assessment.

The paper provides an in-depth analysis of state-of-the-art neural network architectures and their specific applications in seismic interpretation. Convolutional Neural Networks (CNNs) and U-Net architectures are examined for their effectiveness in fault detection,

achieving clean, consistent results in hours compared to months of manual work. Advanced architectures like TransUnet and Dual U-Net are explored for their ability to capture both local and global geological features. The study covers supervised learning approaches for lithofacies classification and stratigraphic interpretation, as well as unsupervised methods combining Principal Component Analysis (PCA) with Self-Organizing Maps (SOM) for exploratory analysis in data-limited regions.

Significant emphasis is placed on practical implementation challenges and solutions. The paper details workflows for handling SEGY format data using Python ecosystems (segvio, segysak with xarray and dask), strategies for multi-attribute analysis, and approaches to overcome the critical bottleneck of labeled training data scarcity through synthetic data generation, augmentation techniques, and utilization of public datasets (F3, FORCE, TerraNubis). Emerging research frontiers are thoroughly discussed, including self-supervised learning (SSL) for leveraging unlabeled data, physics-informed neural networks (PINNs) for incorporating domain knowledge, and uncertainty quantification (UQ) methods for assessing model confidence.

Keywords: machine learning, deep learning, 3D seismic data, convolutional neural networks, geophysical interpretation, fault detection, Python, SEGY.

Дмитрієва Ірина Сергіївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3298-7563>

Дмитренко Андрій Миколайович - аспірант кафедри Інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4939-987X>

Dmytriieva Iryna - Ph.D., Ass.Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3298-7563>

Dmytrenko Andrii - Postgraduate Student of the Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4939-987X>

КОНЦЕПЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ З МАТЕМАТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОЇ ОСВІТИ

Анотація. Пропонується новий підхід до проектування систем контролю знань здобувачів освіти з дисципліни «Диференціальне числення». На відміну від більшості існуючих систем контролю знань авторська розробка не містить баз завдань та відповідей. Завдання генеруються у відповідності до сформульованих правил з використанням випадкових чисел. Згенерована задача (функція, для якої треба знайти похідну) перевіряється на коректність, після чого пропонується здобувачу. Відповідь на завдання надається у вигляді формули, а не числа, що також є відмінною рисою авторської розробки. Висновок про вірний розв'язок відбувається на підставі порівняння результатів аналітичного та чисельного диференціювання заданої функції для декількох значень аргументу

Ключові слова: дистанційне навчання, система контролю знань, диференціальне числення, система правил для генерації завдань, алгоритм оцінки відповідей.

Постановка проблеми. У роботі пропонується новий підхід до проектування систем контролю знань для здобувачів освіти з дисципліни «Диференціальне числення», що враховує сучасні виклики дистанційного навчання та потреби у персоналізованому підході до навчання. Традиційні системи контролю знань зазвичай використовують статичні бази завдань і відповідей, що обмежує їхню гнучкість та можливість індивідуального підходу до кожного студента. Авторська розробка кардинально відрізняється від таких систем завдяки динамічному підходу до генерації завдань. Завдання формуються автоматично на основі заданих правил з використанням випадкових чисел, що дозволяє забезпечити унікальність кожного завдання та адаптацію під індивідуальні можливості кожного здобувача освіти.

Згенеровані завдання являють собою функції, для яких необхідно знайти похідну. Важливим етапом є перевірка коректності згенерованого завдання перед його поданням здобувачу освіти. Це забезпечує уникнення помилок у формулюванні завдань та підвищує точність контролю. Особливістю запропонованого підходу є форма надання відповіді: вона подається не у вигляді числового значення, а у вигляді математичної формули, що дозволяє оцінювати не тільки правильність розв'язку, але й глибину розуміння здобувачем методів диференціювання та математичних принципів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розвиток технологій у сфері обробки символічних виразів, чисельних методів обчислення та машинного навчання відкриває

нові можливості для створення інтелектуальних систем, які здатні ефективно оцінювати та контролювати знання студентів щодо вивчених математичних концепцій. Такі системи можуть автоматично адаптуватися до потреб користувача, надаючи індивідуалізований підхід до контролю якості знань та надаючи зворотний зв'язок для подальшого вдосконалення навчання.

Враховуючи велику кількість здобувачів освіти у сучасних освітніх установах та потребу в ефективному контролі їхніх знань з математики, розробка інтелектуальних інформаційних систем для цієї цілі може мати значний практичний вплив на якість освіти та підготовку фахівців у цій області. Такі системи можуть сприяти покращенню результатів навчання та забезпечити більш об'єктивну оцінку знань студентів. Вони доступні для виконання в мережі та не вимагають реєстрації користувача, що робить їх зручними для використання у навчальних процесах.

Одним з таких напрямків є платформи для створення тестів. Ці платформи надають інструменти для створення різноманітних тестів з математики, які зазвичай використовують базу задач, базуються на стандартизованих або заздалегідь підготовлених наборах завдань [1]. Такі системи мають низку характеристик та архітектурних підходів, що визначають їх функціональні можливості.

Тестові системи з фіксованими завданнями являють собою найбільш поширений тип систем, де користувачам пропонуються завдання з бази даних, які підготовлені викладачами або розробниками курсу. Особливостями таких систем є:

- наявність заздалегідь складених тестів з варіантами відповідей або відкритими питаннями;
- здійснення оцінювання на порівнянні відповіді користувача з коректною відповіддю в базі даних;
- використання, як правило, для перевірки базових знань або швидкого оцінювання.

Прикладом таких систем є тести на освітніх платформах, таких як Moodle [2], де викладачі можуть створювати питання на тему "Диференціальне числення" з варіантами відповідей або формулюванням відкритих питань.

Інтерактивні тренажери включають завдання, що спрямовані на інтерактивне навчання з можливістю перевірки відповідей в реальному часі. Особливостями таких тренажерів є:

- завдання вибираються з фіксованого набору, проте можуть мати певні варіації (наприклад, різні параметри у функціях, для яких потрібно знайти розв'язок);
- підказки та покроковий розбір рішень для самонавчання;
- можливість інтеграції з іншими навчальними матеріалами (відеоуроки, теоретичні довідники).

Прикладом таких систем можна назвати Khan Academy [3], де користувач може отримати завдання на знаходження похідних і після кожного кроку отримати підказки або пояснення.

Системи з адаптивним навчанням. Це системи, що використовують базу завдань і алгоритми адаптивного навчання для автоматичного підбору завдань залежно від рівня підготовки учня. Особливості цих систем є:

- база завдань зазвичай має структуру з завданнями різної складності;
- система аналізує результати попередніх спроб і адаптує наступні завдання для більш точного оцінювання або для вдосконалення знань;
- можуть містити як теоретичні, так і практичні завдання.

Прикладом такої системи може виступати ALEKS (Assessment and Learning in Knowledge Spaces) [4] – система, що адаптує навчальний план залежно від відповідей учня і пропонує нові завдання для зміцнення слабких знань.

Онлайн-платформи для екзаменів та контрольних робіт - це системи використовуються для проведення тестів, контрольних та екзаменів у режимі реального часу. Викладачі завантажують завдання у базу даних, а студенти виконують їх за певний час. Особливості цієї системи такі:

- можливість автоматичного оцінювання завдань (наприклад, якщо відповідь є числовою або функціональною);
- підтримка різних типів питань: відкриті питання, завдання з вибором відповіді, тощо;
- інтеграція з системами дистанційного навчання для відстеження прогресу студента.

Прикладом таких платформ є Proctorio [5] та ExamSoft [6], які використовуються для проведення онлайн-екзаменів.

На основі наведених інформаційних систем з базами задач можна визначити такі ключові особливості:

- фіксованість завдань: усі завдання зберігаються в базі даних і надаються користувачам у певній послідовності або випадковому порядку;
- автоматичне оцінювання: більшість систем порівнює відповіді користувача з відповідями в базі даних і надає автоматичну оцінку;
- підтримка різних типів завдань: включає завдання на вибір правильної відповіді, відкриті питання та завдання, де потрібно ввести математичну формулу або графік;
- обмеження: незважаючи на наявність великої бази завдань, такі системи можуть обмежувати варіативність завдань, оскільки кожне завдання потребує попереднього налаштування.

Недоліками систем із базою задач є:

- обмежена варіативність: завдання не генеруються динамічно, що може призвести до повторення або передбачуваності;
- менш гнучкі в адаптації: системи зазвичай не здатні адаптувати завдання під поточний рівень знань студента в реальному часі;
- висока залежність від попередньої підготовки бази завдань: для покриття всіх можливих варіантів необхідно підготувати великий обсяг завдань вручну.

Сучасне програмне забезпечення для вивчення математики допомагає не лише виконувати складні обчислення, але й глибше розуміти різні математичні концепції. Серед найбільш популярних інструментів у цій сфері можна виділити MATLAB і Maple, які забезпечують можливості для роботи з символьними та числовими обчисленнями.

MATLAB використовується для математичних обчислень, у тому числі - похідних функцій. Його можливості охоплюють символьне диференціювання використовуючи Symbolic Math Toolbox, чисельне обчислення похідних складних функцій, а також побудову 2D та 3D графіків для наочного представлення результатів. Головними перевагами є широкий набір математичних функцій і модулів, а також можливість інтеграції з іншими програмами, такими як Simulink. Проте вартість ліцензії досить висока, а для ефективного використання необхідні базові знання програмування.

Maple – це система, що підтримує символьні обчислення та використовується для роботи математичними виразами, включаючи диференціювання, інтегрування та аналіз функцій. Інтерактивний інтерфейс спрощує навчання і виконання обчислень, а об'ємна бібліотека математичних функцій і шаблонів допомагає швидко знаходити шукані результати. Однією з ключових переваг Maple є можливість покрокового пояснення результатів, що особливо корисно для студентів і викладачів. Також Maple підтримує як аналітичні, так і чисельні методи обчислення. Серед її недоліків висока вартість ліцензії та обмежена інтеграція з іншими програмами.

Аналіз сучасних досліджень та існуючих інформаційних систем для контролю знань з математичних дисциплін у дистанційній освіті показує, що більшість таких рішень базуються на використанні статичних баз завдань, що кардинально відрізняється від запропонованого підходу.

Мета дослідження полягає в розробці та тестуванні алгоритмів генерації задачі, обчислення її розв'язку, порівнянні його з розв'язком, якій одержаний здобувачем, та висновку про вірну (або невірну) відповідь.

Викладання основного матеріалу дослідження. Сформулюємо основні вимоги, яким, на думку авторів повинна задовольняти сучасна система контролю знань.

1. Наявність баз завдань та відповідей потребує постійного їх оновлення, що не виключає ймовірності помилок при вводі даних. Збій позиціонування між відповідними елементами масивів завдань та відповідей також буде призводити до невірного оцінювання знань здобувачів. Таким чином, людський фактор буде негативно впливати на надійне функціонування системи.

Основний висновок з цього - система не повинна містити бази завдань та бази відповідей. Завдання повинні генеруватися автоматично на підставі відповідних правил, перевірятися на коректність та вирішуватися в окремому програмному модулі.

На основі цих критеріїв були вирішено розробляти систему у вигляді вебдодатку RESTful API архітектури. Такий підхід забезпечує гнучкість і масштабованість системи, оскільки відсутність статичних баз даних дозволяє динамічно формувати завдання та автоматизувати їх перевірку. Для реалізації цього підходу було обрано архітектуру RESTful API, яка є широко визнаним стандартом у веброзробці. У розроблюваній си-

стемі RESTful API буде відповідати за генерацію завдань, перевірку їхньої коректності та обробку відповідей користувачів. Це забезпечить ефективну взаємодію між клієнтською та серверною частинами, а також дозволить масштабувати систему відповідно до зростаючих вимог.

2. Оскільки мова йде про математичні дисципліни, то відповідь на завдання може бути у вигляді числа, як у більшості існуючих систем, або у вигляді формули. Якщо відповідь розглядається як число, то здобувач повинен обрати одне з декількох варіантів (з яких лише одна вірна відповідь), або ввести власний розв'язок задачі. В останньому випадку висновок про вірну відповідь приймається на підставі оцінки близькості двох чисел – еталонного розв'язку, якій міститься в базі відповідей, та числа, що надає здобувач. Така ідеологія має, окрім чисто технічних проблем, суттєвий недолік, а саме, вона дає можливість здобувачу ввести умовно вірну відповідь не розв'язуючи задачу. Наприклад, в розділі «Диференціальне числення» завдання передбачає обчислити похідну деякої функції $y = f(x)$ в точці $x = x_0$. Якщо здобувач пам'ятає визначення похідної, то він легко знайде її приблизне значення:

$$y' \approx \frac{f(x_0 + \delta) - f(x_0)}{\delta}$$

причому у переважній більшості випадків її точність буде цілком задовільною у порівнянні з результатом аналітичного диференціювання. Очевидно, що для одержання такого розв'язку здобувачу не потрібні знання про правила диференціювання та похідні елементарних функцій. Тим не менш, така відповідь буде інтерпретована як вірна, що не буде об'єктивною оцінкою.

Для запобігання таких випадків система повинна оцінювати відповідь, яка надається не числом, а формулою. Для цього були використанні такі бібліотеки як MathJax [7].

MathJax - це бібліотека для відображення математичних формул на веб-сторінках. Вона дозволяє автоматично перетворювати математичні формули, написані в різних форматах, в графічний вигляд, який можна відображати на сторінці. Вона дозволяє відображати формули в звичному виді, що полегшує сприйняття математичного контенту користувачами.

3. Слід мати на увазі, що в загальному випадку не існує єдиного варіанту записи формули, тобто один і той самий розв'язок задачі можна записати в різний спосіб. Нехай завдання є в визначенні похідної функції

$$y = 3x^2 + 15x + \sin x$$

Вірну відповідь можна представити такими формулами:

$$6x + 15 + \cos x;$$

$$\cos x + 3(2x + 5);$$

$$3(5 + 2x) + \cos x, \text{ і так далі. Всі ці формули є вірними.}$$

Таким чином, інтерпретувати розв'язок у вигляді формули як символну константу абсолютно неможливо. Потрібен алгоритм, який дозволив би зробити висновок про вірну відповідь при наявності значної кількості варіантів запису формули. Тому було розроблено функцію який переводить формулу з текстового типу у математичний тип, що дозволяє проводити математичні операції над виразом.

Резюмуючи вищевикладене, сучасна інтерактивна система контролю знань з математичних дисциплін повинна задовольняти таким вимогам:

- генерація завдань відбувається на підставі правил з використанням випадкових чисел;
- відбувається оцінка відповіді, яка задається формулою;
- висновок про вірну відповідь є об'єктивним та не залежить від способу запису формули.

Нижче будуть розглянути можливі шляхи для забезпечення таких вимог.

Генерація завдань. Як приклад розглянемо алгоритм генерації завдань для першого (найнижчого) рівню розділу «Диференціальне числення», який передбачає лише знання здобувача про похідні елементарних функцій та використання основних правила диференціювання.

Чергове завдання генерується таким чином:

$$f(x) = A_1 + A_2, \quad (1)$$

де A_1 та $A_2 \in [1, 2, 3, 4]$ – натуральні випадкові числа ($A_1 \neq A_2$), які визначають функцію:

- 1 – степенева функція: $ax^n + b$;
- 2 – логарифмічна функція: $\log_p(cx)$;
- 3 – показникова функція: q^{dx} ;
- 4 – тригонометрична функція: $\varphi_i(gx)$.

Параметри функцій обираються випадковим чином як елементи векторів відомої розмірності, наприклад:

$$\bar{a}^T = \bar{d}^T = [-2; -1; 1; 2; 3; 4], \quad \bar{b}^T = [-3; -2; -1; 0; 1; 2; 3; 4], \quad \bar{n} = [1; 2; 3; 4],$$

$$\bar{p}^T = [2; e; 3; 10], \quad \bar{c}^T = \bar{g}^T = [2; 3; 4; 5; 6], \quad \bar{i}^T = [1; 2; 3; 4].$$

Тригонометричні функції визначаються в такий спосіб:

$$\varphi_1 = \sin(gx),$$

$$\varphi_2 = \cos(gx),$$

$$\varphi_3 = tg(gx),$$

$$\varphi_4 = ctg(gx).$$

Таким чином, генерація завдання передбачає наявність шести або семи випадкових чисел для визначення конкретних функцій та їх параметрів. Наприклад, випадковим числом 1; 4; 4; 2; 4; 2; 5 відповідає такий варіант задачі:

$$f(x) = 2x^4 - 2 + \cos(3x) \quad (2)$$

Алгоритм перевірки відповідей. Розглянемо ситуацію, коли три здобувача одержали завдання у вигляді (2) та надали такі відповіді:

$$\phi_1(x) = 8x - 3 \sin(3x), \quad (3)$$

$$\phi_2(x) = 8x + \sin(3x), \quad (4)$$

$$\phi_3(x) = 8x - \sin(3x) \cdot 3 \quad (5)$$

Очевидно, що функція (4) не є вірним розв'язком задачі, а функції (3) та (5) – вірні розв'язки незважаючи на те, що мають різний вигляд. Очікується, що система спроможна ідентифікувати будь-яку відповідь як вірну, або невірну.

При розробці системи контролю знань використовувався наступний підхід. Функція, зображення якої одержує здобувач, та функція, зображення якої він надає як відповідь, є процедурами-функціями програмного модуля, тобто перетворюють вхідне значення аргументу у вихідне значення функції. Для ідентифікації відповіді як вірної необхідно, щоб приблизне значення похідної функції (2) в будь-якій точці з області існування функції було в деякому сенсі близьким до значення похідної, що визначена з використанням аналітичного диференціювання, тобто зі значеннями функцій (3) – (5) у тій самій точці:

$$\left| \frac{f(x_0 + \delta) - f(x_0)}{\delta} - \phi(x_0) \right| \leq \varepsilon \quad (6)$$

З метою підвищення надійності ідентифікації вірних відповідей вважається доцільним перевіряти умову (6) на множині точок:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{f(x_i + \delta) - f(x_i)}{\delta} - \phi(x_i) \right)^2} \leq \varepsilon \quad (7)$$

На основі опису можна створити концепт системи для автоматизованого генерування та перевірки знань з теми похідних функцій можна створити UML діаграму (рис. 1):

- генерація випадкових чисел — система на початковому етапі генерує набір випадкових чисел, які будуть використані для створення математичного виразу;
- генерація математичної функції — на основі згенерованих чисел система створює математичний вираз за певними правилами за темою «Диференціальне числення»;
- форматування виразу за допомогою MathJax — математичний вираз передається в модуль MathJax для коректного відображення. Це дозволяє представити його у зручному для читання вигляді на вебсторінці;
- вебсторінка — після того як вираз відформатований і відображений, користувач взаємодіє з вебсторінкою. Він отримує завдання у вигляді математичного виразу та

вводить свою відповідь у поле введення. Для зручності користувач може скористатися набором заготовлених функцій, які дозволяють швидко додати їх до поля введення. Після введення відповіді користувач надсилає свою відповідь до системи для перевірки. Крім того, нижче кнопки відображається відповідь, яка введена користувачем, з метою перевірки коректності свого запису перед надсиланням (рис. 2);

- чисельне диференціювання функції — для кожної згенерованої функції обчислюється чисельна похідна методом скінченних різниць на множині точок;

- обчислення аналітичної похідної — використовуючи аналітичні методи, обчислюється точне значення похідної на множині точок;

- порівняння результатів — порівняння результатів чисельного та аналітичного диференціювання за формулою (7);

- висновок про успішне виконання — на основі порівняння система визначає, чи є відповідь користувача правильною або неправильною, і відображає результат у бінарному виді, або записує його.

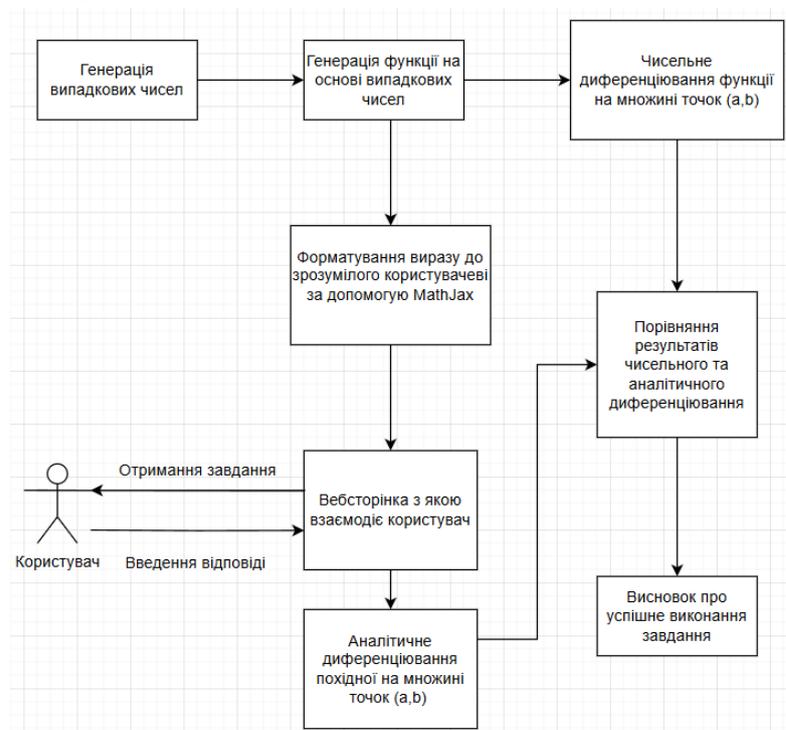


Рисунок 1 – UML діаграма системи



Рисунок 2 – Прототип системи

Висновки. Аналіз результатів чисельних експериментів дозволив зробити висновок про доцільність подальшого розвитку систем контролю знань в напрямку, що запропонований авторами. Наявність системи правил дозволяє генерувати значно більшу кількість завдань, ніж при ручному формування бази завдань. Можливість надання здобувачем відповіді у вигляді формули та використання авторського алгоритму її перевірки дозволяє більш об'єктивно оцінити рівень знань.

Недоліком розробленої системи є обмеження на складність формул, які має ввести здобувач після виконання завдання. При підвищенні рівня складності підвищується ймовірність помилок при вводі. Таки обмеження виключають можливість генерації задач високого рівня (так званих «задач з зірочкою»).

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Filatov H.V., Radul O.A. On the implementation of distance learning forms in the educational process of engineering disciplines // Education and Management. Vol. 12. – 2009. – No. 3–4. – P. 118–125.
2. Moodle Course: Junior Mathematics | Mount Orange School.
URL: <https://school.moodledemo.net/course/view.php?id=46> (date of access: 06.09.2024).
3. Khan Academy. Derivatives course. URL: <https://www.khanacademy.org/math/calculus-1/cs1-derivatives-definition-and-basic-rules> (date of access: 09.09.2024).
4. ALEKS. Adaptive mathematics courses.
URL: https://www.aleks.com/about_aleks/course_products?cmscache=detailed&detailed=ghighedmath16_colalgebra#ghighedmath16_colalgebra (date of access: 12.10.2024).
5. Proctorio. URL: <https://proctorio.com/> (date of access: 12.10.2024).
6. ExamSoft. URL: <https://examsoft.com/> (date of access: 02.11.2024).
7. MathJax Documentation. URL: <https://docs.mathjax.org/en/latest/> (date of access: 02.11.2024).
8. Sobchuk V.V., Chychurin O.V., Kalchuk I.V., Zhygallo T.V. Solving Problems in Analysis and Differential Equations Using Mathematica Computer Algebra Tools: Textbook. Kyiv: Millennium, 2021. 420 p.
9. Andrunyk V.A., Vysotska V.A., Pasichnyk V.V., Chyrun L.B., Chyrun L.V. Numerical Methods in Computer Science: Study Guide. Lviv: Novyi Svit – 2000, 2020. 536 p.

Received 24.01.2026.
Accepted 29.01.2026.

Concepts for designing knowledge assessment systems in mathematical disciplines under distance education conditions

The article presents a novel approach to the design of knowledge assessment systems for students studying the discipline of Differential Calculus. In contrast to most existing systems, which rely on fixed databases of tasks and answers, the proposed solution introduces a dynamic model that automatically generates tasks based on predefined rules using random numbers. Each generated task represents a mathematical function for which the derivative must be calculated. Before presenting the task to the student, the system checks its validity. The answer is submitted not as a numeric value but in the form of a symbolic mathematical expression. This significantly enhances the quality of assessment by enabling evaluation of

both correctness and depth of understanding of differentiation methods. Recent advances in symbolic computation, numerical methods, and machine learning have opened new possibilities for developing intelligent systems capable of adapting to the individual needs of learners. Existing platforms — such as Moodle, Khan Academy, ALEKS, Proctorio, and ExamSoft — offer various testing frameworks. However, they are primarily based on static question banks, which often limits their flexibility, adaptability, and ability to provide personalized feedback. This paper outlines the limitations of such systems and highlights the necessity for more adaptive and interactive approaches in mathematical e-learning environments.

The objective of the study is to develop and test an algorithm for task generation, automatic solution computation, comparison with the student's submitted answer, and determination of the answer's correctness. The study also aims to ensure that the method used allows for formula-based responses to be evaluated fairly, even when the same solution is presented in multiple algebraically equivalent forms. The core of the proposed system is built on a RESTful API architecture. This allows tasks to be generated in real-time using randomized parameters and validated programmatically before delivery. The solution also utilizes MathJax for formatting and displaying mathematical content in a clear, readable manner within a web interface. An essential component of the system is its capability to interpret symbolic expressions and compare them analytically and numerically. The comparison is done by evaluating the difference between the user-submitted derivative and the system-generated solution over a range of values using both symbolic differentiation and numerical finite difference methods.

A specific example is discussed involving the generation of derivative problems from randomly selected elementary functions—polynomial, exponential, logarithmic, and trigonometric. The structure of such problems is defined by a set of randomly generated parameters, which enables a practically unlimited variety of tasks. The system includes mechanisms to compare student-submitted expressions with the reference solution through evaluation at multiple points, reducing the likelihood of false positives and ensuring objectivity. The findings suggest that this rule-based task generation approach enables a higher degree of individualization and significantly reduces the dependency on static databases. Moreover, assessing symbolic expressions rather than mere numerical values allows the system to better reflect the actual understanding and application of calculus concepts by students. The proposed system was prototyped and visualized through a UML diagram and web interface, demonstrating its practicality and user-centered design. The results of numerical experiments support the viability of the proposed approach. The system's rule-based task generation and symbolic response evaluation enhance assessment reliability and objectivity. Unlike systems reliant on preloaded question banks, the proposed method provides flexibility, reduces manual workload, and supports deeper learning. However, the current system is best suited for problems of basic to moderate complexity, as higher-level tasks may require more sophisticated symbolic input and parsing mechanisms.

Keywords: distance learning, knowledge control system, differential calculus, system of rules for generating tasks, algorithm for evaluating answers.

Зеленцов Дмитро Гегемонович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем, Навчально-науковий інститут “Український державний хіміко-технологічний університет”.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1959-3153>

Шаповалов Кирило Ігорович – аспірант кафедри інформаційних систем, Навчально-науковий інститут “Український державний хіміко-технологічний університет”.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8069-8136>

Zelentsov Dmytro – doctor of technical sciences, professor, head of department of information systems, scientific and educational institute “Ukrainian State University of Chemical Technology”.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1959-3153>

Shapovalov Kyrylo – postgraduate student, department of information systems, scientific and educational institute “Ukrainian State University of Chemical Technology”.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8069-8136>

ЗМІСТ

CONTENTS

Калініна І.О., Гожий О.П., Шиян С.І., Гожий В.О., Пастернак Л.Ю.		Kalinina I.O., Gozhyj O.P., Shiyan S.I., Gozhyi V.O., Pasternak L.Yu.	
Інтелектуальна система прогнозування параметрів паливно-мастильних матеріалів	3	Intelligent system for forecasting fuel and lubricant parameters	3
Гончаров Я.А., Зайцева Т.А.		Honcharov Y.A., Zaytseva T.A.	
Чисельне дослідження контактної взаємодії тіл складної форми на основі інтегрованих обчислювальних платформ	15	Numerical investigation of the contact interaction of complex-shaped bodies using integrated computational platforms	15
Гнатушенко Вік.В., Удовик І.М., Хайпке К., Гнатушенко М.В.		Hnatushenko Vik., Udovyk I., Heipke Ch., Hnatushenko M.	
Застосування методів машинного навчання для аналізу впливу лісових пожеж на знімки Sentinel-2 по Україні	27	Applying machine learning techniques to analyze forest fire impacts on Sentinel-2 imagery across Ukraine	27
Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергєєва К.Л., Рой Д.М.		Kavats O. O., Kavats Y. V., Sergieieva K.L., Roi D. M.	
Оцінка точності методів автоматизованого картування водних поверхонь на основі спектральних індексів	36	Assessment of the accuracy of automated mapping methods for water surfaces based on spectral indices	36
Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Виродов О.С.		Zimoglyad A.Yu., Guda A.I., Vyrodov O.S.	
Вплив системи фокусування на чутливість PIR датчику	46	The influence of the focusing system on the sensitivity of the PIR sensor	46
Атаманиук О.В., Сулема Є.С.		Atamaniuk O.V., Sulema Y.S.	
Метод резонансних запитів для вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників	55	Resonance request method for conflict resolution in the multiagent systems of the digital twins	55

Бодю К.О., Вовк С.М. Інтерактивний веб-ресурс з вивчення інформатики у закладах загальної середньої освіти із підключенням ШІ-агента	66	Bodiu K.O., Vovk S.M. Interactive web resource for teaching computer science in general secondary education with AI agent integration	66
Пікільняк А.В., Цивінда Н.І. Стратегії цифрової трансформації підготовки інженерів-механіків в умовах дистанційного навчання	76	Pikilniak A.V., Tsyvinda N.I. Strategies of digital transformation in the training of mechanical engineers under distance learning conditions	76
Волковський О.С., Нікішина О.Ю. Моделювання системи черг для генерації SEO-оптимізованих текстів у високонавантаженому середовищі	85	Volkovskiy O.S., Nikishyna O.Yu. Modeling a queue system for generating SEO-optimized texts in a highly loaded environment	85
Спирінцев В.В. Спирінцева О.В. Дубіна Є.С. Дослідження ефективності реалізації мікросервісної системи моніторингу користувачів та ресурсів хмарної платформи AWS	97	Spiritsev V.V. Spiritseva O.V. Dubina E.S. Research on the effectiveness of the implementation of a microservice system for monitoring users and resources of the AWS cloud platform	97
Кравець О.В., Махоніна К.В. Дослідження нестационарного поля температури за товщиною багатошарової зовнішньої стінової панелі житлового будинку в зимовий період	105	Kravets O.V., Makhonina K.V. Study of the non-stationary temperature field along the thickness of a multilayer external wall panel of a residential building in winter	105
Твердоступ М.І. Гармонійний перетворювач індуктивності в частоту на основі конвертора імпедансу	112	Tverdostup M.I. Harmonic inductor-to-frequency converter based on impedance convert	112
Пономарьов І.В. Архітектура безпечного криптогаманця на основі механізмів Air-Gap та мультипідпису	118	Ponomarev I.V. Architecture of a secure cryptocurrency wallet based on Air-Gap and multisignature mechanisms	118

Хандецький В.С., Полухін Г.В., Скуратовський І.А. Конверсна передача блоків фреймів в зашумлених каналах комп'ютерних мереж	125	Khandetskyi V.S., Polyhin G.V., Skuratovskyi I.A. The pipeline transmission of frame blocks in noisy computer channels reliability criteria	125
Матвєєва Н.О. Порівняльний аналіз ефективності застосування патернів	132	Matveeva N.O. Comparative analysis of the effective- ness of pattern application	132
Островська К.Ю., Борисюк В.П. Інформаційна система для генерації зображень з можливістю федеративного навчання та донавчання генеративних моделей	139	Ostrovska K., Borysyuk V. Information system for image generation with the possibility of federated learning and further training of generative models	139
Віжевський П.В., Савенко О.С. Поведінкове профілювання користувачів та виявлення аномалій на основі генетичного алгоритму	148	Vizhevskyi P., Savenko O. Evolutionary tuning of a UEBA and anomaly detection	148
Гаврилюк Є.А., Струков В.М., Узлов Д.Ю. Інтегрований AI-базований фреймворк для задач неперервного покриття з геометричними обмеженнями	160	Havryliuk Y., Strukov V., Uzlov D. Integrated AI-based framework for the continuous coverage problems with geometric constraints	160
Клєцков О.М., Шевельова А.Є., Лобода В.В. Ефект поверхневої пружності при аналізі нанотріщини в антиплоскому полі навантажень	177	Kletskov O., Sheveleva A., Loboda V. Effect of surface elasticity in the analysis of nanocracks under anti-plane load field	177
Коряшкіна Л.С., Станіна О.Д. Математичне моделювання розміщення логістичних центрів та двоетапного розподілу матеріальних потоків: сценарний підхід	191	Koriashkina L.S., Stanina O.D. Mathematical modeling of the location of logistics centers and two-stage distribution of material flows: a scenario approach	191

Сачанюк-Кавецька Н.В., Гетманюк О.І., Гуда О.В. Використання штучного інтелекту у вивченні вищої математики студентами технічних спеціальностей: освітній ефект	212	Sachaniuk-Kavets`ka N.V., Hetmaniuk O.I., Huda O.V. The use of artificial intelligence in the study of higher mathematics by students of technical specialties: educational effect	212
Смоленський М.М., Сіденко Є.В. Проектування ефективної архітектури RFID-орієнтованої медичної системи	226	Smolenskyi M.M., Sidenko Ie.V. Designing an efficient architecture for an RFID-oriented medical system	226
Сокол Г.І., Снобко Д.О. Методики розрахунків та експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок у знищенні шкідників акустичним способом	237	Sokol G.I., Snobko D.O. Methods of calculations and experimental studies of the mechanical characteristics of the bodies of living larvae in the destruction of pests by acoustic methods	237
Сулейманов Є.С. Інтелектуальна система класифікації аудіофайлів	252	Suleymanov Y. Intelligent audio file classification system	252
Дмитрієва І.С., Дмитренко А.М. Застосування методів машинного навчання в обробці 3D сейсмічних зображень	262	Dmytriieva I.S., Dmytrenko A.M. Application of machine learning methods in the processing of 3D seismic images	262
Зеленцов Д.Г., Шаповалов К.І. Концепції проектування систем контролю знань з математичних дисциплін в умовах дистанційної освіти	272	Zelentsov D., Shapovalov K. Concepts for designing knowledge assessment systems in mathematical disciplines under distance education conditions	272

РЕФЕРАТИ

УДК 004.85

Калініна І.О., Гожий О.П., Шиян С.І., Гожий В.О., Пастернак Л.Ю. **Інтелектуальна система прогнозування параметрів паливно-мастильних матеріалів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.3 – 14.

У статті розглядається інтелектуальна система прогнозування для моніторингу об'ємів палива на судні. Інформаційна система складається з таких підсистем: підсистема збору та зберігання інформації, підсистема підготовки даних, підсистема аналізу та попередньої обробки даних, підсистема моделювання та підсистема прогнозування. В експериментальній частині дослідження розглядається проблема прогнозування обсягів можливого заповнення систем зберігання паливом на основі звіту про регулярний збір даних про рівень та кількість палива в резервуарах на судні. Інформаційна система дозволяє отримувати високоякісні прогнози кількості палива для резервуарів різних типів, а також узагальнені показники.

Бібл. 15, іл. 4, табл. 2.

УДК 378, 519.876.5

Гончаров Я.А., Зайцева Т.А. **Чисельне дослідження контактної взаємодії тіл складної форми на основі інтегрованих обчислювальних платформ** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.15 – 26.

У роботі представлено підхід до розв'язання задач моделювання контактної взаємодії жорстких циліндричних штампів із пружним півпростором, що поєднує застосування Ansys для побудови та розрахунку скінченно-елементних моделей і MATLAB для розширеного постпроцесінгу та візуалізації. Особливістю роботи є інтегроване використання чисельних методів та засобів комп'ютерної візуалізації в різних програмних пакетах для аналізу контактної взаємодії штампів складної геометрії з пружним ізотропним однорідним півпростором. Розглядаються штампи з круговим, еліптичним та симетрично-здеформованим еліптичним кільцевим перерізом, що формує двозв'язну область контакту під дією центрального навантаження в умовах осесиметричної постановки задачі. Виконано аналіз результатів, побудовано графіки.

Бібл. 11, іл. 5.

УДК 004.93, 004.8

Гнатушенко Вік.В., Удовик І.М., Хайпке К., Гнатушенко М.В. **Застосування методів машинного навчання для аналізу впливу лісових пожеж на знімки Sentinel-2 по Україні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.27 – 35.

Використовуючи мультиспектральні знімки з супутника Sentinel-2, ми пропонуємо алгоритм на основі моделей машинного навчання для виявлення спалених лісових ділянок. Створено новий набір даних про лісові пожежі, придатний для семантичних моделей сегментації. Запропонований алгоритм використовує підхід на основі конволюційних нейронних мереж (CNN) і був протестований на знімках супутника

Sentinel, отриманих у жовтні 2022 року для півострова Кінбурн, Україна, з точністю 95% за показником IoU.

Бібл. 12.

УДК 528.9:556.3

Кавац О.О., Кавац Ю.В., Сергєєва К.Л., Рой Д.М. **Оцінка точності методів автоматизованого картування водних поверхонь на основі спектральних індексів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.36 – 45.

У роботі представлено комплексний аналіз ефективності спектральних водних індексів Sentinel-2 у поєднанні з автоматизованим порогуванням за методом Оцу для картування поверхневих вод на територіях, що постраждали від техногенних катастроф. Об'єктом дослідження обрано акваторію колишнього Каховського водосховища, ландшафт якої після руйнування Каховської ГЕС характеризується різкою спектральною неоднорідністю, наявністю змішаних пікселів і фрагментованою береговою лінією. Для аналізу використано оптичні знімки Sentinel-2 із середньою просторовою роздільною здатністю, що дало змогу оцінити вплив просторово-структурної неоднорідності ландшафтів, включно з фрагментованими водоймами, заболоченими ділянками, оголеним ґрунтом та молодою рослинністю. Для оцінки ефективності виділення води застосовано чотири спектральні індекси – NDWI, MNDWI, AWEIsh та AWEInsh – із подальшим автоматичним визначенням оптимального порогу за методом Оцу.

Бібл. 12., Рис. 3.

УДК 681.586.5

Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Виродов О.С. **Вплив системи фокусування на чутливість PIR датчику** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.46 – 54.

Було проведено дослідження можливості використання датчику без лінзи та зі звичайною скляною лінзою. Дослід показав, що без лінзи перед сенсором, в останнього вкрай низька чутливість. Без лінзи сигнал на виході в 10 разів слабший по амплітуді. Коли ж використовувалась скляна лінза сигнал зовсім зник з виходу сенсора. Це пов'язано з тим, що звичайне скло не пропускає інфрачервоне випромінювання відповідного діапазону. З іншого боку, при використанні сенсора без лінзи реакція на предмети, що були розташовані у близької зоні, була більшою.

Бібл. 3, іл. 13.

УДК 004.021

Атаманюк О.В., Сулема Є.С. **Метод резонансних запитів для вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.55 – 65.

Розглядаються різні підходи до організації взаємодії та координації у розподілених системах, зокрема відомі протоколи вирішення конфліктів у мультиагентних середовищах цифрових двійників. Розроблено новий метод вирішення конфліктів та

розподілу ресурсів, в основі якого лежить механізм резонансних запитів. Також розглянуто питання оптимального налаштування адаптивного порогу чутливості та функції резонансу для зменшення комунікаційного навантаження мережі та запропоновано математичну модель селективної фільтрації запитів на основі подібності станів агентів. Наведено діаграми послідовностей та компонентів для систем із застосуванням розробленого методу, наведено результати аналізу ефективності застосування запропонованого підходу у порівнянні з класичними протоколами, а також дослідження швидкодії програмної реалізації залежно від кількості агентів у системі.

Бібл. 12, іл. 2, табл. 4.

УДК 004.9:37

Бодю К.О., Вовк С.М. **Інтерактивний веб-ресурс з вивчення інформатики у закладах загальної середньої освіти із підключенням ІІІ-агента** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.66 – 75.

У статті розглянуто розробку та дослідження інтерактивного веб-ресурсу для навчання інформатики у закладах загальної середньої освіти в умовах реформи Нової української школи. Особливу увагу приділено інтеграції ІІІ-агента як інструмента підтримки учнів під час виконання завдань, зокрема з програмування. Описано архітектуру системи, функціональні можливості для різних ролей користувачів та результати експериментального оцінювання ефективності використання штучного інтелекту. Отримані результати підтверджують доцільність застосування інтерактивних веб-засобів із ІІІ для підвищення якості та персоналізації навчального процесу з інформатики.

Бібл. 8, іл. 7.

УДК 378.147:621:004.9

Пікільняк А.В., Цивінда Н.І. **Стратегії цифрової трансформації підготовки інженерів-механіків в умовах дистанційного навчання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.76 – 84.

Розглянуто проблеми підготовки інженерів-механіків у дистанційному навчанні в умовах воєнного стану. Проаналізовано провідні PLM-системи та їхню придатність для формування цифрових компетенцій, інтеграції CAD/CAM/CAE та відповідності ДСТУ. Запропоновано рекомендації щодо ефективного впровадження PLM у навчальний процес.

Бібл. 10.

УДК 004

Волковський О.С., Нікішина О.Ю. **Моделювання системи черг для генерації SEO-оптимізованих текстів у високонавантаженому середовищі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.85 – 96.

Робота присвячена розробці системи для автоматизованої генерації SEO-оптимізованих текстів з подальшим моделюванням системи черг. Досліджені механізми взаємодії з ІІІ-сервісами для оптимізації процесу генерації текстів. Синтезована Q-

схема для вирішення конкретної задачі, адаптований асинхронний моделюючий алгоритм, здійснене моделювання системи черг SEO-оптимізованих текстів. Вдосконалені алгоритми взаємодії з ШІ-сервісами. Показано, що основним вузьким місцем є етап перевірки унікальності, що обґрунтовує використання черг і паралельної обробки. Запропонований підхід забезпечує стабільну роботу системи, зменшення витрат і збереження високої якості контенту.

Бібл. 3, іл. 4, табл. 3.

УДК 004.4:004.738.5

Спирінцев В.В. Спирінцева О.В. Дубіна Є.С. Дослідження ефективності реалізації мікросервісної системи моніторингу користувачів та ресурсів хмарної платформи AWS // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.97 – 104.

Реалізовано та досліджено мікросервісну систему моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS, а також проведено порівняльний аналіз двох реалізацій сервісу метрик на мовах C# та Go. Виконано експериментальне тестування продуктивності мікросервісів на екземплярах AWS EC2, проведено аналіз використання CPU, оперативної пам'яті та часу відповіді сервісів, а також розроблено методику порівняльної оцінки ефективності реалізацій, що визначає закономірності зміни продуктивності під різними рівнями навантаження. Отримані результати визначають доцільність застосування зазначених мов програмування в системах електронної комерції з хмарною архітектурою, що розширює уявлення про вибір технологій для мікросервісних систем моніторингу.

Бібл. 6, іл. 6, табл. 1.

УДК 536.212:699.059

Кравець О.В., Махоніна К.В. Дослідження нестационарного поля температури за товщиною багатошарової зовнішньої стінової панелі житлового будинку в зимовий період // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.105 – 111.

Проведено нестационарний тепловий розрахунок чотиришарової зовнішньої стінової панелі з урахуванням добової зміни температури навколишнього повітря в зимовий період; побудовано криві залежності температури кожного шару стінової панелі від часу. Результати роботи можуть бути використаними при проектуванні огорожувальних конструкцій житлових та промислових будівель з метою оптимального вибору різновидів теплозахисних матеріалів та визначення геометричних параметрів окремих шарів багатошарової зовнішньої стінової панелі житлового будинку.

Бібл. 7, іл. 2, табл. 1.

УДК 621.373–187.4

Твердоступ М.І. Гармонійний перетворювач індуктивності в частоту на основі конвертора імпедансу // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.112 – 117.

Проаналізовано особливості побудови перетворювача індуктивності в частоту гармонійних коливань на основі конвертора імпедансу. Знайдено умови управління крутизною характеристики перетворювання вимірювального генератора на основі конвертора імпедансу шляхом зміни ступеня компенсації початкової індуктивності параметричного давача, який увімкнено в резонансний контур.

Бібл. 4, іл. 3.

УДК 004.056.5:004.41

Пономарьов І.В. **Архітектура безпечного криптогаманця на основі механізмів Air-Gap та мультипідпису** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.118 – 124.

Розглядається архітектура криптогаманця, що базується на фізичній ізоляції приватних ключів від мережі. Запропоновано дворівневу систему, що складається з онлайн-модуля Watcher та офлайн-модуля Signer. Взаємодія між ними реалізована через QR-коди з використанням стандарту PSBT, що виключає цифрові вектори атак. Програмна реалізація виконана на стеку Vue.js, Quasar, Cordova та Electron, що забезпечує кросплатформність застосунку. Використання механізму мультипідпису M-of-N та шифрування AES-256 гарантує колективний контроль та захист даних від фізичного доступу. Запропоноване рішення ефективно балансує між високим рівнем безпеки та зручністю використання.

Бібл. 14, іл. 1.

УДК 681.3.07

Хандецький В.С., Полухін Г.В., Скуратовський І.А. **Конвеєрна передача блоків фреймів в зашумлених каналах комп'ютерних мереж** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.125 – 131.

Визначено залежність загальної кількості переданих фреймів від об'єму додатку, що передається, довжини вікна та імовірності його успішної передачі. Показано, що при порівняно невеликому рівні помилок $BER=5 \cdot 10^{-7}$ і використанні вікна в $n=40$ стандартних фреймів кількість пошкоджених фреймів не перевищує 20%. При $BER=10^{-6}$ ця кількість складає 40% і частина з них увійде до складу третього вікна. Це приведе до збільшення часу, необхідного для формування тієї ж послідовності фреймів що поступила з мережевого рівня відправника. При підвищеному рівні завад ($BER=5 \cdot 10^{-6}$) ситуація ще суттєво погіршується. Щоб уникнути суттєвого зменшення смуги пропускання мережі, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER=5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.

Бібл. 5, табл.1, іл. 1.

УДК 004.021; 004.383

Матвеева Н.О. **Порівняльний аналіз ефективності застосування патернів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.132 – 138.

Розглянуто та систематизовано особливості реалізації основних породжувальних патернів мовами програмування C#, C++, Python та Java. Проведено порівняльний ана-

ліз реалізацій патернів. Визначено спільні риси та відмінності у підходах до реалізації патернів залежно від рівня типізації та механізмів керування пам'яттю.

Бібл. 7, табл. 10.

УДК 004.8:621.391

Островська К.Ю., Борисюк В.П. **Інформаційна система для генерації зображень з можливістю федеративного навчання та донавчання генеративних моделей** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.139 – 147.

У роботі розглянуто розробку та дослідження інформаційної системи для генерації зображень на основі сучасних генеративних моделей штучного інтелекту з підтримкою федеративного навчання та механізмів донавчання.

Бібл.9, рис.4, табл.1.

УДК 004.056.53:004.89

Віжевський П.В., Савенко О.С. **Поведінкове профілювання користувачів та виявлення аномалій на основі генетичного алгоритму** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.148 – 159.

Розглянуто проблему експлуатаційної придатності поведінкової аналітики користувачів за умов дрейфу, дисбалансу та контекстної мінливості, що провокує хибні тривоги й нестабільний потік сповіщень. Метою є побудова методу профілювання, який зберігає інтерпретованість і адаптивність та мінімізує шум алертів. Запропоновано потокову модель з віконною агрегацією та експоненційним забуванням, а конфігурацію детектора (підмножина ознак, ваги, поріг і параметр адаптації) підібрано генетичним алгоритмом із штрафами за FPR, волатильність тривог і складність. На CLUE-LDS отримано $F1\ 0.075 \rightarrow 0.093$, $FPR\ 0.019 \rightarrow 0.013$, $CV_alert\ 0.52 \rightarrow 0.39$, складність $0.85 \rightarrow 0.35$.

Бібл. 10, іл. 0, табл. 1.

УДК 519.688

Гаврилюк Є.А., Струков В.М., Узлов Д.Ю. **Інтегрований AI-базований фреймворк для задач неперервного покриття з геометричними обмеженнями** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.160 – 176.

У статті розглянуто інтегровану методологію AI-базованого гібридного фреймворку для розв'язання задачі неперервного покриття з урахуванням геометричних обмежень.

Метою дослідження є формування єдиного гібридного фреймворку, який інтегрує метаевристичні та меметичні методи оптимізації з нейромережевими surrogate-моделями та UML-орієнтованою архітектурою інформаційної системи.

Бібл. 21.

УДК 539.3

Клецков О.М., Шевельова А.Є., Лобода В.В. **Ефект поверхневої пружності при аналізі нанотріщини в антиплоскому полі навантажень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.177 – 190.

Досліджено вплив поверхневої пружності на напружено-деформований стан тріщини типу III в умовах антиплоского зсуву. Було використано модель поверхневої пружності Гуртина-Мердока, яка враховує механічні ефекти біля поверхні тріщини. Застосовано метод комплексних функцій та сингулярне інтегро-диференціальне рівняння з ядром типу Коші. Для розв'язання задачі використано представлення функцій у вигляді рядів Чебишева та метод колокації. Показано, що врахування поверхневої пружності дозволяє уникнути сингулярності напружень у вершинах тріщини. Отримані результати демонструють суттєвий вплив мікророзмірів тріщин на розподіл напружень, що важливо для наномеханіки.

Бібл. 14, іл. 5, табл. 1.

УДК 519.8

Коряшкіна Л.С., Станіна О.Д. **Математичне моделювання розміщення логістичних центрів та двоетапного розподілу матеріальних потоків: сценарний підхід** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.191 – 211.

Розглянуто двоетапний процес евакуації населення та розподілу матеріальних ресурсів у системі екстреної логістики, яка передбачає розташування пунктів збору та центрів евакуації. Населення в регіоні вважається неперервно розподіленим, а вибір пунктів та центрів здійснюється з урахуванням сценаріїв надзвичайних ситуацій і обмеженої доступності територій та ресурсів. Метою є ефективна організація евакуаційних і матеріальних потоків за допомогою математичної моделі та методів оптимізації, що дозволяють визначати координати, кількість і місткість пунктів збору та центрів евакуації, а також раціонально розподіляти людські і матеріальні потоки між етапами.

Бібл. 17, іл. 1.

УДК 004.8:51+378.147

Сачанюк-Кавецька Н.В., Гетманюк О.І., Гуда О.В. **Використання штучного інтелекту у вивченні вищої математики студентами технічних спеціальностей: освітній ефект** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.212 – 225.

Дослідження підтверджує, що AI-системи суттєво прискорюють виконання стандартних математичних операцій (диференціальні рівняння, матричні обчислення, задачі математичного аналізу), дозволяючи студентам фокусуватися на концептуальному засвоєнні матеріалу. Адаптивні AI-алгоритми створюють індивідуалізовані освітні маршрути з оптимальною складністю завдань та негайним зворотним зв'язком, покращуючи мотивацію і результативність навчання. AI-платформи забезпечують автоматизоване доведення теорем та моделювання складних систем, розвиваючи дослідницькі компетентності студентів. Практичне значення роботи полягає у обґрунтуванні впровадження

AI-технологій у технічних ЗВО, що узгоджується з цифровою трансформацією освіти. Майбутні дослідження спрямовані на розробку контекстних алгоритмів пояснювально-го штучного інтелекту.

Бібл. 15, іл. 7, табл. 2.

УДК 004.9

Смоленський М.М., Сіденко Є.В. **Проектування ефективної архітектури RFID-орієнтованої медичної системи** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.226 – 236.

У статті розглянуто застосування RFID-технологій у медичних інформаційних системах. Проведено аналіз сучасних підходів до архітектури таких систем та обґрунтовано доцільність використання клієнт-серверної моделі з реляційною базою даних. Запропонована архітектура забезпечує високу масштабованість, захищеність і ефективне управління медичними даними. Окрему увагу приділено питанням автоматизації, безпеки та гнучкої інтеграції з іншими інформаційними системами.

Бібл. 21, іл. 4, табл. 1.

УДК 531.7

Сокол Г.І., Снобко Д.О. **Методики розрахунків та експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок у знищенні шкідників акустичним способом** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.237 – 251.

З метою знищення шкідливих комах та їх личинок акустичним способом розроблені методики розрахунків та експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок колорадського жука. Робота проводиться в рамках розділу прикладної механіки «Біомеханіка». Запропонований та використаний у вимірах механічних характеристик новий пристрій для проведення експериментальних досліджень механічних характеристик тіл живих личинок, конструктивна схема якого захищена патентом України на винахід та корисну модель. Знищення личинок колорадських жуків акустичними хвилями дозволить перейти від хімічних методів знищення шкідників, що токсичні для людини, до екологічно чистого, акустичного.

Бібл. 42, іл. 2, табл. 2.

УДК 004.85, 519.688

Сулейманов Є.С. **Інтелектуальна система класифікації аудіофайлів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.252 – 261.

Розглядається ефективність жанрової класифікації аудіофайлів шляхом використання часових та частотних аудіоознак для навчання багатошарового перцептрона. Реалізовано автоматичний підбір гіперпараметрів за допомогою бібліотеки Optuna. Запропоновано механізм покращення якості класифікації шляхом додаткової обробки результатів передбачення нейромережі за допомогою методів жорсткого, м'якого та рангового голосування за методом Борда. Отримані результати демонструють істотне підвищення точності класифікації у порівнянні з базовими підходами.

Бібл. 11, іл. 5, табл. 1.

УДК 004.9

Дмитрієва І.С., Дмитренко А.М. **Застосування методів машинного навчання в обробці 3D сейсмічних зображень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.262 – 271.

У статті представлено комплексний технічний огляд застосування методів машинного навчання та глибокого навчання для аналізу 3D сейсмічних зображень у геофізичній розвідці. Розглядається проблема обробки терабайтних обсягів сейсмічних даних, які традиційно вимагають місяців ручної інтерпретації, та обґрунтовується необхідність переходу до автоматизованих методів аналізу.

Бібл. 16.

УДК 004.9:378.147:51

Зеленцов Д.Г., Шаповалов К.І. **Концепції проектування систем контролю знань з математичних дисциплін в умовах дистанційної освіти** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(162). – Дніпро, 2026. – С.272 – 282.

В статті пропонується новий підхід до проектування систем контролю знань здобувачів освіти з дисципліни «Диференціальне числення». На відміну від більшості існуючих систем контролю знань авторська розробка не містить баз завдань та відповідей. Завдання генеруються у відповідності до сформульованих правил з використанням випадкових чисел. Згенерована задача (функція, для якої треба знайти похідну) перевіряється на коректність, після чого пропонується здобувачу. Відповідь на завдання надається у вигляді формули, а не числа, що також є відмінною рисою авторської розробки. Висновок про вірний розв'язок відбувається на підставі порівняння результатів аналітичного та чисельного диференціювання заданої функції для декількох значень аргументу.

Бібл. 9.

UDC 004.85

Kalinina I.O., Gozhyj O.P., Shiyan S.I., Gozhyi V.O., Pasternak L.Yu. **Intelligent system for forecasting fuel and lubricant parameters** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.3 – 14.

The article considers an intelligent forecasting system for monitoring fuel volumes on a ship. The information system consists of the following subsystems: information collection and storage subsystem, data preparation subsystem, data analysis and preprocessing subsystem, modeling subsystem and forecasting subsystem. The experimental part of the study considers the problem of forecasting the volumes of possible filling of fuel storage systems based on a report on regular data collection on the level and amount of fuel in tanks on a ship. The information system allows you to obtain high-quality forecasts of the amount of fuel for tanks of various types, as well as generalized indicators.

Bibl. 15, ill. 4, table. 2.

UDC 378, 519.876.5

Honcharov Y.A., Zaytseva T.A. **Numerical investigation of the contact interaction of complex-shaped bodies using integrated computational platforms** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.15 – 26.

The paper presents an approach to solving problems of modeling the contact interaction of rigid cylindrical punches with an elastic half-space, which combines the use of Ansys for constructing and solving finite element models and MATLAB for advanced post-processing and visualization. A distinctive feature of the study is the integrated use of numerical methods and computer visualization tools in different software packages to analyze the contact interaction of punches of complex geometry with an elastic isotropic homogeneous half-space. The punches considered have circular, elliptic, and symmetrically deformed elliptic ring cross-sections, which form a doubly connected contact region under a central load in an axisymmetric problem setting. The results are analyzed and plots are constructed.

Ref. 11, ill. 5.

UDC 004.93, 004.8

Hnatushenko Vik., Udovyk I., Heipke Ch., Hnatushenko M. **Applying machine learning techniques to analyze forest fire impacts on Sentinel-2 imagery across Ukraine** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.27 – 35.

Utilizing multispectral imagery from the Sentinel-2 satellite, we propose an algorithm based on machine learning models for the detection of burnt forest areas. A new dataset on forest fires has been created, suitable for semantic segmentation models. The proposed algorithm uses an approach based on convolutional neural networks (CNN), it was tested on Sentinel satellite images acquired in October 2022 for the Kinburn Peninsula, Ukraine, to have an accuracy in terms of IoU of 95%.

Refs. 12.

UDK 528.9:556.3

Kavats O. O., Kavats Y. V., Sergieieva K.L., Roi D. M. **Assessment of the accuracy of automated mapping methods for water surfaces based on spectral indices** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.36 – 45.

The paper presents a comprehensive analysis of the effectiveness of Sentinel-2 spectral water indices in combination with automated thresholding using the Otsu method for mapping surface waters in areas affected by man-made disasters. The object of the study was the water area of the former Kakhovka Reservoir, whose landscape after the destruction of the Kakhovka HPP is characterized by pronounced spectral heterogeneity, the presence of mixed pixels, and a fragmented shoreline. Sentinel-2 optical images of medium spatial resolution were used for the analysis, which made it possible to assess the impact of spatial and structural heterogeneity of landscapes, including fragmented water bodies, wetlands, bare soil, and young vegetation. Four spectral indices – NDWI, MNDWI, AWEIsh, and AWEInsh – were used to evaluate water delineation effectiveness, followed by automatic determination of the optimal threshold using the Otsu method.

Bib. 12, Fig. 3.

UDC 681.586.5

Zimoglyad A.Yu., Guda A.I., Vyrodov O.S. **The influence of the focusing system on the sensitivity of the PIR sensor** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.46 – 54.

A study was conducted to investigate the possibility of using a sensor without a lens and with a conventional glass lens. The experiment showed that without a lens in front of the sensor, the latter has extremely low sensitivity. Without a lens, the output signal is 10 times weaker in amplitude. When a glass lens was used, the signal completely disappeared from the sensor output. This is due to the fact that conventional glass does not transmit infrared radiation of the corresponding range. On the other hand, when using a sensor without a lens, the reaction to objects located in the near zone was greater.

Bib. 3, fig. 13.

UDC 004.021

Atamaniuk O.V., Sulema Y.S. **Resonance request method for conflict resolution in the multiagent systems of the digital twins** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.55 – 65.

Various approaches to organizing interaction and coordination in distributed systems are examined, specifically focusing on existing conflict resolution protocols within multi-agent digital twin environments. A novel method for conflict resolution and resource allocation is developed, based on the resonance request mechanism. The study also addresses the optimal tuning of the adaptive sensitivity threshold and the resonance function to reduce network communication load, proposing a mathematical model for selective query filtering based on agent state similarity. Sequence and component diagrams for systems implementing the developed method are presented. Furthermore, the paper demonstrates the results of an efficiency analysis comparing the proposed approach with classical protocols, alongside a

performance study of the software implementation relative to the number of agents in the system.

Bibl. 12, ill. 2, tabl. 4.

UDC 004.9:37

Bodiu K.O., Vovk S.M. **Interactive web resource for teaching computer science in general secondary education with AI agent integration** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.66 – 75.

The article presents the development and evaluation of an interactive web-based resource for teaching computer science in secondary education institutions within the framework of the New Ukrainian School reform. Special attention is paid to the integration of an AI agent as a supportive tool for students while completing tasks, particularly programming assignments. The system architecture and key functional features are described. An experimental study was conducted to assess the impact of AI assistance on learning outcomes and task completion efficiency. The results demonstrate the effectiveness and feasibility of using AI agents to improve the quality and personalization of computer science education.

Bibl. 8, fig. 7.

UDC 378.147:621:004.9

Pikilniak A.V., Tsyvinda N.I. **Strategies of digital transformation in the training of mechanical engineers under distance learning conditions** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.76 – 84.

The article addresses the challenges of training mechanical engineers through distance learning under wartime conditions. Leading PLM systems are analyzed for their suitability in developing digital competencies, integrating CAD/CAM/CAE, and complying with national standards (DSTU). Recommendations for effective PLM implementation in the educational process are proposed.

Ref. 10.

UDC 004

Volkovskiy O.S., Nikishyna O.Yu. **Modeling a queue system for generating SEO-optimized texts in a highly loaded environment** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.85 – 96.

The paper is devoted to the development of a system for the automated generation of SEO-optimized texts with subsequent modeling of a queue system. Mechanisms of interaction with AI services aimed at optimizing the text generation process are investigated. A Q-scheme for solving a specific problem is synthesized, an asynchronous modeling algorithm is adapted, and a queue system for SEO-optimized texts is modeled. The algorithms of interaction with AI services are improved. It was shown that the main bottleneck is the stage of uniqueness verification, which justifies the use of queues and parallel processing. The proposed approach ensures stable system operation, cost reduction, and preservation of high content quality.

Ref. 3, fig. 4, tabl. 3.

UDC 004.4:004.738.5

Spirintsev V.V. Spirintseva O.V. Dubina E.S. **Research on the effectiveness of the implementation of a microservice system for monitoring users and resources of the AWS cloud platform** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.97 – 104.

A microservice system for monitoring users and resources of the AWS cloud platform has been implemented and studied, and a comparative analysis of two implementations of the metrics service in the C# and Go languages has been conducted. Experimental testing of microservice performance on AWS EC2 instances has been performed, analysis of CPU usage, RAM usage, and service response time has been conducted, and a methodology for comparative assessment of implementation effectiveness has been developed, which determines the patterns of performance changes under different load levels. The results obtained determine the feasibility of using the specified programming languages in e-commerce systems with cloud architecture, which expands the idea of the choice of technologies for microservice monitoring systems.

Bibl. 6, ill. 6, table. 1.

UDK 536.212:699.059

Kravets O.V., Makhonina K.V. **Study of the non-stationary temperature field along the thickness of a multilayer external wall panel of a residential building in winter** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.105 – 111.

A non-stationary thermal calculation of a four-layer external wall panel was carried out, taking into account the daily change in ambient air temperature in the winter period; curves of the temperature dependence of each layer of the wall panel on time were constructed. The results of the work can be used in the design of enclosing structures of residential and industrial buildings in order to optimally select types of heat-shielding materials and determine the geometric parameters of individual layers of a multilayer external wall panel of a residential building.

Bibl. 7, il. 2, tabl. 1.

UDC 621.373 – 187.4

Tverdostup M.I. **Harmonic inductor-to-frequency converter based on impedance convert** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.112 – 117.

The features of the construction of an inductance-to-frequency converter for harmonic oscillations based on an impedance converter are analysed. Conditions for controlling the steepness of the conversion characteristic of a measuring generator based on an impedance converter by changing the degree of compensation of the initial inductance of a parametric sensor connected to a resonant circuit have been found.

Bibl. 4, ill. 3.

UDC 004.056.5:004.41

Ponomarev I.V. **Architecture of a secure cryptocurrency wallet based on Air-Gap and multisignature mechanisms** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.118 – 124.

The article considers a cryptocurrency wallet architecture based on the physical isolation of private keys from the network. A two-tier system consisting of an online Watcher

module and an offline Signer module is proposed. Interaction between them is implemented via QR codes using the PSBT standard, which eliminates digital attack vectors. The software is developed using Vue.js, Quasar, Cordova, and Electron, ensuring cross-platform compatibility. The use of the M-of-N multisignature mechanism and AES-256 encryption guarantees collective control and data protection against physical access. The proposed solution effectively balances high-level security with user convenience.

Ref. 14, fig. 1.

UDC 681.3.07

Khandetskyi V.S., Polyhin G.V., Skuratovskyi I.A. **The pipeline transmission of frame blocks in noisy computer channels** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.125 – 131.

The dependence of the total number of frames transmitted successfully and damaged during transmission on the volume of the transmitted application, the length of the window and the probability of its successful transmission has been determined. It is shown that with a relatively small error rate $BER=5 \cdot 10^{-7}$ and the use of the window contained $n=40$ standard frames, the number of copies of damaged frames transmitted as part of the window at the second stage does not exceed 20%. At $BER=10^{-6}$ this number is already 40%, i.e. some of these frames will be re-distorted during transmission at the second stage and will be included in the third window. This will lead to an increase in the time required to form the same sequence of frames that arrived from the third network layer. At higher interference levels ($BER=5 \cdot 10^{-6}$), the situation worsens significantly. To avoid a significant reduction in network throughput, it is necessary to limit the window length to $n=6$ at $BER=5 \cdot 10^{-6}$ and $n=20$ at $BER=10^{-6}$.

Ref. 5, tabl.1, fig. 1.

UDC 004.021; 004.383

Matveeva N.O. **Comparative analysis of the effectiveness of pattern application** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.132 – 138.

The features of implementing basic generative patterns in the C#, C++, Python, and Java programming languages are considered and systematized. A comparative analysis of pattern implementations is performed. Common features and differences in approaches to pattern implementation are identified depending on the level of typing and memory management mechanisms.

Bibl. 7, tabl. 10.

UDC 004.8:621.391

Ostrovska K., Borysyuk V. **Information system for image generation with the possibility of federated learning and further training of generative models** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.139 – 147.

The paper considers the development and research of an information system for image generation based on modern generative artificial intelligence models with support for federated learning and further training mechanisms.

Bibl.9, Fig.4, tabl.1.

UDC 004.056.53:004.89

Vizhevskiy P., Savenko O. **Evolutionary tuning of a UEBA and anomaly detection** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.148 – 159.

This paper addresses the operational limits of user and entity behavior analytics under drift, class imbalance, and contextual variability, which often yield persistent false alarms and unstable alert streams. The goal is to design a profiling method that remains interpretable and adaptive while reducing alert noise. We use a streaming window-based representation with exponential forgetting, and apply a genetic algorithm to optimize the detector configuration (feature subset, weights, decision threshold, and adaptation parameter) with explicit penalties for FPR, alert volatility, and model complexity. Experiments on CLUE-LDS with controlled profile-change injection show moderate F1 improvement (0.075→0.093) alongside stronger gains in FPR (0.019→0.013), CV_alert (0.52→0.39), and complexity (0.85→0.35).

Refs. 10, figs. 0, tables 1.

UDC 519.688

Havryliuk Y., Strukov V., Uzlov D. **Integrated AI-based framework for the continuous coverage problems with geometric constraints** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.160 – 176.

The paper presents an integrated methodology for an AI-based hybrid framework designed to solve the continuous coverage problem under geometric constraints.

The aim of the study is to construct a unified hybrid framework that integrates metaheuristic and memetic optimization methods with neural surrogate models and a UML-oriented information system architecture.

Bibl.21.

UDC 539.3

Kletskov O., Sheveleva A., Loboda V. **Effect of surface elasticity in the analysis of nanocracks under anti-plane load field** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.177 – 190.

The influence of surface elasticity on the stress–strain state of a Mode III crack under antiplane shear conditions has been investigated. The Gurtin–Murdoch surface elasticity model, which accounts for mechanical effects near the crack surface, was employed. The method of complex functions and a singular integro-differential equation with a Cauchy-type kernel were applied. To solve the problem, the unknown functions were expanded in Chebyshev polynomial series and the collocation method was used. It is shown that accounting for surface elasticity eliminates the stress singularity at the crack tips. The obtained results reveal a significant effect of crack microdimensions on the stress distribution, which is important for nanomechanics.

Bible 14, ill. 5, tab. 1.

UDC 519.8

Koriashkina L.S., Stanina O.D. **Mathematical modeling of the location of logistics centers and two-stage distribution of material flows: a scenario approach** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.191 – 211.

The two-stage process of population evacuation and distribution of material resources in an emergency logistics system, which involves the placement of collection points and evacuation centers, is examined. The population is considered continuously distributed across the region, while the selection of points and centers accounts for emergency scenarios and limited accessibility of territories and resources. The aim is to efficiently organize evacuation and material flows using a mathematical model and optimization methods that determine the location, number, and capacity of collection points and evacuation centers, as well as rationally allocate human and material flows between stages.

Bibl. 17, ill. 1.

UDC 004.8:51+378.147

Sachaniuk-Kavets`ka N.V., Hetmaniuk O.I., Huda O.V. **The use of artificial intelligence in the study of higher mathematics by students of technical specialties: educational effect** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.212 – 225.

The study confirms that AI systems significantly accelerate the execution of standard mathematical operations (such as differential equations and matrix calculations), allowing students to focus on the conceptual understanding of the material. Adaptive AI algorithms create individualized learning pathways with optimally challenging tasks and instant feedback, enhancing both student motivation and learning outcomes. AI platforms support automated theorem proving and complex systems modeling, thereby fostering students' research competencies. The practical significance of this work lies in substantiating the integration of AI technologies into technical universities, aligning with the broader digital transformation of education. Future research will focus on developing contextual algorithms for explainable artificial intelligence.

Bibl. 15, fig. 7, tabl. 2.

UDC 004.9

Smolenskyi M.M., Sidenko Ie.V. **Designing an efficient architecture for an RFID-oriented medical system** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.226 – 236.

The article explores the use of RFID technologies in medical information systems. It analyzes various architectural approaches and justifies the use of a client-server model with a relational database. The proposed architecture ensures high scalability, data security, and effective medical data management. Special attention is paid to automation, protection, and flexible integration with other healthcare IT systems.

Ref. 21, fig. 4, tabl. 1.

UDK 531.7

Sokol G.I., Snobko D.O. **Methods of calculations and experimental studies of the mechanical characteristics of the bodies of living larvae in the destruction of pests by acoustic methods** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.237 – 251.

In order to destroy harmful insects and their larvae by acoustic means, methods of calculations and experimental studies of the mechanical characteristics of the bodies of living Colorado potato beetle larvae have been developed. The work is carried out within the framework of the section of applied mechanics "Biomechanics". A new device for conducting

experimental studies of the mechanical characteristics of the bodies of living larvae was proposed and used in the measurements of mechanical characteristics. The design scheme of this device is protected by a Ukrainian patent for an invention and utility model. The destruction of Colorado potato beetle larvae by acoustic waves will allow us to move from chemical methods of pest control, which are toxic to humans, to environmentally friendly, acoustic methods.

Bibl. 42, ill. 2, tab. 2.

UDC 004.85, 519.688

Suleymanov Y. **Intelligent audio file classification system** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.252 – 261.

Genre classification effectiveness of using time-domain and frequency-domain audio features for training a multilayer perceptron was observed. The hyperparameters were automatically optimized using the Optuna framework. Furthermore, a post-processing mechanism based on hard voting, soft voting, and the Borda count method was introduced. Experimental results demonstrate that the proposed ensemble approach significantly enhances the classification accuracy compared to the baseline model.

Ref. 11, fig. 5, tab. 1.

UDC 004.9

Dmytrieva I.S., Dmytrenko A.M. **Application of machine learning methods in the processing of 3D seismic images** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.262 – 271.

The article presents a comprehensive technical review of the application of machine learning and deep learning methods for analyzing 3D seismic images in geophysical exploration. It addresses the problem of processing terabytes of seismic data, which traditionally requires months of manual interpretation, and justifies the need to transition to automated analysis methods.

Ref. 16.

UDC 004.9:378.147:51

Zelentsov D., Shapovalov K. **Concepts for designing knowledge assessment systems in mathematical disciplines under distance education conditions** // System technologies. N 1(162) - Dnipro, 2026.- P.272 – 282.

The article presents a novel approach to the design of knowledge assessment systems for students studying the discipline of Differential Calculus. In contrast to most existing systems, which rely on fixed databases of tasks and answers, the proposed solution introduces a dynamic model that automatically generates tasks based on predefined rules using random numbers. Each generated task represents a mathematical function for which the derivative must be calculated. Before presenting the task to the student, the system checks its validity. The answer is submitted not as a numeric value but in the form of a symbolic mathematical expression.

Ref. 9.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Випуск 1 (162)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 28.01.2026. Підписано до друку 30.01.2026.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 21,64. Обл.–видавн. арк. – 18,94.

Тираж 300 прим. Замовл. – 01/26

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University

in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені

П.Могилы, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет

радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.

Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна