



КНУБА

ISSUE 4(17) | 2025



SMART TECHNOLOGIES

INDUSTRIAL AND CIVIL ENGINEERING
INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDERS

Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine)

Certificate of the State Registration
KB № 24366-14206 P dated 13.02.2020.
Decision of the National Council of Ukraine on
Television and Radio Broadcasting No. 223 dated
01.02.2024.

ISSN 2415-8550 (print) ISSN 2415-8569 (online)

DOI: 10.32347/st.2025.4

It is published twice a year

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

SMART TECHNOLOGIES

INDUSTRIAL AND CIVIL ENGINEERING

Founded in August 2015

Issue 4(17), 2025

EDITOR-IN-CHIEF

Yurii Khlaponin Dr.Tech.Sc., Prof., Full member (Academician) of the Ukrainian Academy of Sciences, KNUCA, Kyiv

DEPUTY EDITOR

Sergii Lenkov Dr.Tech.Sc., Prof., Honored worker of science and technology of Ukraine, laureate of the state prize of Ukraine in the field of science and technology of Ukraine

EDITORIAL BOARD

Petro Kulikov Dr. Econ.Sc., Prof., KNUCA, Kyiv

Oleksandr Bezverkhy Dr. Phys. and Math.Sc., Prof., National Transport University, Kyiv

Volodymyr Blintsov Dr.Tech.Sc., Prof., acad. Makarov Mykolaiv University of Shipbuilding, Mykolaiv

Natalia Bushuieva Dr.Tech.Sc., Prof., KNUCA, Kyiv

Denis Chernyshev Dr.Tech.Sc., Prof., KNUCA, Kyiv

Leonid Dvorkin Dr.Tech.Sc., Prof., National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

Mykola Dyomin Corr.-member of NAAU, Dr. of Architecture, Prof., KNUCA, Kyiv

Stepan Epoyan Dr.Tech.Sc., Prof., KhNUCA, Kharkiv

Viktor Grinchenko Full member of NASU, Dr.Tech.Sc., Prof., NAS Institute of Hydromechanics of Ukraine, Kyiv

Sergii Klymenko Corr.-member of NASU, Dr.Tech.Sc., Prof., NAS V.M. Bakul Institute of Superhard Materials of Ukraine, Kyiv

Veniamin Kubenko Full member of NASU, Dr. Phys. and Math.Sc., Prof., NAS Institute of Mechanics of Ukraine, Kyiv

Oleg Limarchenko Dr.Tech.Sc., Prof., Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv

Oleksandr Luhovskiy Dr.Tech.Sc., Prof., NTU of Ukraine Igor Sikorsky "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

Leonid Mazurenko Dr.Tech.Sc., Prof., NAS Institute of Electrodynamics of Ukraine, Kyiv

Ivan Nazarenko Dr.Tech.Sc., Prof., Academy of Construction of Ukraine, Kyiv

Alla Pleshkanovska Dr.Tech.Sc., Prof., KNUCA, Kyiv

Ihor Rebezniuk Dr.Tech.Sc., Prof., National Forestry University of Ukraine, Kyiv

Oleksandr Terentyev Dr.Tech.Sc., Prof., KNUCA, Kyiv

Valentyn Tomashevskiy Dr.Tech.Sc., Prof., NTU of Ukraine Igor Sikorsky "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

Valery Tovbych Dr. of Architecture, Prof., KNUCA, Kyiv

Leonid Zamikhovskiy Dr.Tech.Sc., Prof., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk

INFLUENCE OF WATER ON AN ENVIRONMENT AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Natural sciences
Mathematics and statistics
Information technologies
Mechanical and electric engineering
Automation and instrument-making
Production and technologies
Architecture and building

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Winfried Auzinger PhD eng., Ass.Prof., Vienna University of Technology (Austria)

Vladislav Bogdanov PhD Phys. and Math., Snr.Res.Ass., Progressive Research Solutions Pty, Sidney (Australia)

Goran Bryntse PhD, Ass.Prof., SERO, European Renewable Energy Federation, Borlange (Sweden)

Carsten Drebenstedt Dr.hab, Prof., Technical University Bergakademie, Freiberg (Germany)

Marian Druza PhD eng., Prof. University of Zilina (Slovakia)

Miklos Hajdu PhD eng., Prof., Budapest University of Technology and Economics (Hungary)

Viktor Mashkov Dr.Tech.Sc., Prof., University J. Evangelista Purkyne in Usti-nad-Labem (Czech Republic)

Sergiy Ryzhkov Dr.Tech.Sc., Prof., Zhenjiang ACME Information Technology Co. Ltd, Shengzhou (China)

Mirosław Skibniewski PhD eng., Prof., University of Maryland, College Park (USA)

Henryk Sobczuk Dr. hab, Prof., Lublin University of Technology (Poland)

Nameer Hashim Qasim Dr.Tech.Sc., Assoc. Prof., Cihan University-Sulaimaniya, Sulaymaniyah, Iraq.

Scientific professional publication of Ukraine (Category "Б")
Orders of the Ministry of Education and Science
30.11.2021 № 1290, 07.04.2022 № 320, 01.02.2024 № 223
(specialties – 121, 122, 123, 125, 126, 131, 132, 133, 141, 184, 191, 192, 193)

Approved by Academic Council of Kyiv National University of Construction and Architecture
December 25, 2025, Protocol No.39

Languages of the publications English, Ukrainian

Content

Information technologies

Максим Делембовський, Сергій Гнатюк, Борис Корнійчук	4
Аналіз підходів до впровадження кіберполігонів у підготовці фахівців з кіберзахисту Analysis of approaches to the implementation of cyber ranges in the training of cyber security specialists	
Володимир Вишняков, Кирило Воронежський	12
Аналіз можливості впровадження систем штучного інтелекту у судочинство України Analysis of the possibility of introducing artificial intelligence systems into the judiciary of Ukraine	
Євгенія Шабала, Борис Корнійчук, Сергій Палій	23
Застосування нечіткої логіки для підвищення стійкості біометричної ідентифікації в системах прокторингу Applying fuzzy logic to increase the stability of biometric identification in proctoring systems	
Анастасія Кондакова	32
Оптимізація розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі методом багатокритеріальної мінімізації Optimization of sensor node placement in an urban IoT network using multi-criteria minimization	
Ігор Папроцькимий, Анатолій Пашко	41
Підвищення відмовостійкості мікросервісів високонавантажених систем на основі спостереження за навантаженням Improving the Fault Tolerance of Microservices in Highly Loaded Systems Based on Load Monitoring	
Mykola Malenko	47
Adaptive Hybrid Rollups: AI-Guided Routing between ZK and Optimistic Verification Адаптивні гібридні ролапи: інтелектуальна маршрутизація між ZK та оптимістичною верифікацією	
Kostiantyn Marynskyi	59
AI-based damage mapping for urban infrastructure Картографування пошкоджень міської інфраструктури на основі штучного інтелекту	
Dmytro Mishchuk, Yevhen Mishchuk, Dmytro Korzhevyn	66
Comparative analysis of contour detection algorithms in images in computer vision tasks. Part I Порівняльний аналіз алгоритмів визначення контурів на зображеннях в задачах комп'ютерного зору. Частина 1	
Dmytro Humennyi	75
Ensuring survivability of complex super-critical systems based on hierarchical abstraction model and adaptive reconfiguration in post-critical state Забезпечення живучості складних супер-критичних систем на основі моделі ієрархічної абстракції та адаптивної реконфігурації у післякритичному стані	

Mechanical and electric engineering

Kostiantyn Pochka, Vadym Shalenko, Andrii Masliuk	82
Overview of designs and materials for printing on 3D printers that use FDM technology Огляд конструкції та матеріалів для друку на 3D-принтерах, які друкують по технології FDM	
Микола Пристайло, Андрій Поліщук, Ігор Гонта	91
Методика проведення лабораторних досліджень різання ґрунту деформатором з ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі Methodology for conducting laboratory studies of soil cutting with a deformer with a cutting edge on a pneumatic accumulator	

Architecture and construction

Volodymyr Rashkivskyi, Oleksandr Makhynia, Iryna Dubovyk, Yuri Zaiet..... 101
Methodology for determining the parameters of a belt-type formwork module for vertical reinforced concrete structures
Методика визначення параметрів стрічкового опалубного модуля для будівельних вертикальних залізобетонних конструкцій

Guidelines for Authors..... 112

**Головний редактор журналу,
Доктор технічних наук, професор,
Дійсний член (академік) Української Академії наук**



Юрій ХЛАПОНІН

Аналіз підходів до впровадження кіберполігонів у підготовці фахівців з кіберзахисту

Максим Делембовський¹, Сергій Гнатюк², Борис Корнійчук³

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037,

²Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
просп. Гузара Любомира 1, м.Київ, Україна, 03058,

¹delembovskyi.mm@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-6543-0701,

²serhii.hnatiuk@npp.nau.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4992-0564,

³korniichuk.bv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-3881-1581

Received 17.09.2025, accepted 24.10.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1201>

Анотація. У представлений статті здійснено всебічний аналіз сучасних стратегій застосування кіберполігонів (Cyber Ranges) як інтелектуальних платформ для розвитку професійних компетенцій у сфері кібербезпеки. Дослідження охоплює еволюцію від статичних віртуальних лабораторій до динамічних екосистем, що базуються на хмарних технологіях та цифрових двійниках реальних інфраструктур. Особлива увага приділена інтеграції передових педагогічних концепцій, таких як таксономія Блума та цикл Колба, із галузевими стандартами фреймворку NICE. У роботі детально розглянуто роль автоматизації через агентні системи Retrieval-Augmented Generation (ARCeR) та багатоагентне навчання з підкріпленням (MARL), що дозволяє створювати адаптивні сценарії навчання. Результати дослідження підкреслюють важливість використання багатомодальної аналітики, включаючи біометричний моніторинг стресу, для об'єктивної оцінки готовності фахівців до дій у кризових ситуаціях.

Ключові слова: Кіберполігони, кіберзахист, фреймворк NICE, таксономія Блума, агентні системи RAG, багатоагентне навчання з підкріпленням, цифрові двійники, ситуаційна обізнаність, автоматизація сценаріїв.

ВСТУП

Стрімка цифровізація суспільства та інтеграція штучного інтелекту в повсякденні бізнес-процеси призвели до розширення поверхні кіберзагроз до глобальних масштабів. Станом на 2024–2025 роки світова економіка зазнає збитків від кіберзлочинності, що перевищують 9,5 трильйона доларів США щороку. При цьому



Максим Делембовський
Зав. кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії
к.т.н., доц.



Сергій Гнатюк
проректор Державного університету «Київський авіаційний інститут»
д.т.н., проф.



Борис Корнійчук
доцент кафедри професійної освіти
к.т.н., доц.

глобальний дефіцит кваліфікованих кадрів у сфері кібербезпеки сягає близько 4 мільйонів працівників. Традиційні академічні методи, що базуються переважно на теоретичних лекціях, демонструють свою неспроможність підготувати персонал до протидії сучасним поліморфним атакам.

Кіберполігони вирішують цю проблему, надаючи ізольовані, високонадійні віртуальні середовища для практичного відпрацювання навичок виявлення та реагування на інциденти. Сучасні платформи стають критично важливими інструментами, які дозволяють фахівцям отримувати «бойовий» досвід без ризику для реальних систем організації.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

1. Архітектурні моделі та технологічна база кіберполігонів

Ефективність кіберполігона як навчального інструмента визначається тим, наскільки переконливо середовище відтворює реальні умови функціонування цифрових систем. У практиці досліджень та проектування доцільно розглядати поняття вірності моделювання як багатовимірне. Воно охоплює функціональну правдоподібність атак і захисту, технологічну відповідність стеку, реалістичність часових характеристик, операційний контекст організаційних процедур, а також когнітивне навантаження на учасника під час виконання вправи.

У науковій літературі та галузевих підходах найчастіше виділяють чотири моделі кіберполігонів (рис. 1). Симуляційні платформи відтворюють поведінку систем на рівні програмної логіки та модельованих об'єктів, що забезпечує масштабованість і низьку потребу в апаратних ресурсах. Емуляційні платформи розгортають реальні операційні системи, служби та мережеві компоненти у віртуалізованому або контейнеризованому вигляді, що підвищує автентичність і дозволяє відпрацьовувати професійні процедури практично без спрощень. Накладні підходи будуються на реальній інфраструктурі та доповнюються віртуальними компонентами для безпечного моделювання сценаріїв. Гібридні підходи комбінують властивості симуляції, емуляції та накладання, що дозволяє балансувати реалізм, вартість і керованість.

Для систематичного огляду важливо підкреслити, що ці моделі часто застосовуються одночасно в межах однієї платформи. Наприклад, емуляційний контур може забезпечувати доменну інфраструктуру, робочі станції, SIEM та EDR, тоді як симуляція генерує фоновий трафік користувачів, типові мережеві шумові події та “побутову” активність. Саме така композиція дозволяє створити навчальне середовище, у якому детекція і реагування відбуваються в умовах неповної інформації та великої кількості хибних або малозначущих сигналів.



Рис. 1. Основні категорії полігонів (згенеровано за допомогою ШІ)

Ключовою тенденцією останніх років є перехід від ручного розгортання лабораторій до керованого життєвого циклу середовищ на основі інфраструктури як коду. В такому підході топології мереж, образи машин, правила доступу, політики журналювання та компоненти ін'єкції подій описуються декларативно та зберігаються у репозиторіях. Це забезпечує відтворюваність, прозорість змін, можливість автоматизованого тестування середовищ перед запуском занять, а також контроль версій навчального контенту. У наукових роботах, присвячених мовам опису топологій та підходам до автоматизації розгортання, підкреслюється, що формалізований опис середовищ зменшує ризик “дрейфу конфігурацій” та полегшує масштабування занять на великі групи (Dalla Costa, 2023).

Технологічна база кіберполігонів зазвичай включає кілька шарів (рис. 2). На інфраструктурному рівні використовуються платформи віртуалізації або хмарні сервіси, які надають обчислювальні ресурси та ізоляцію. На рівні мережі застосовуються віртуальні комутатори, маршрутизація, сегментація, а також механізми безпечного виходу в інтернет або повної ізоляції. На рівні ідентичностей зазвичай розгортаються каталоги користувачів, контроль доступу на основі ролей та політики мінімальних привілеїв, оскільки саме помилки в цих механізмах найчастіше стають джерелом інцидентів. На рівні спостережуваності інтегруються компоненти збору логів і телеметрії, а також інструменти кореляції та

візуалізації. У навчальних сценаріях для SOC цей шар стає центральним, адже він дозволяє тренуватися працювати не “по інструкції”, а через розслідування за даними.

Окремим напрямом є полігони для промислових систем та інтернету речей. Тут підвищуються вимоги до гетерогенності середовища та до правдоподібності технологічних сигналів. Через це широко використовується концепція цифрових двійників, яка дозволяє моделювати процеси та одночасно забезпечувати потоки телеметрії для моніторингу й аналізу. Такий підхід зменшує ризики небезпечних наслідків помилок та робить навчання повторюваним.



Рис. 2. Шари технологічної бази кіберполігонів (згенеровано за допомогою ШІ)

2. Педагогічні стратегії та розвиток професійного мислення

Впровадження кіберполігона в освітній процес не може бути зведене до надання студентам доступу до “віртуальної мережі”. Потрібна методика, яка перетворює практичні дії на структуроване формування компетенцій. У цьому контексті основним викликом стає керування складністю, адже надто прості вправи формують поверхневі навички, а надто складні породжують хаотичне “вгадування” та втрату мотивації.

Таксономія Блума дозволяє будувати навчальний шлях як послідовність рівнів, де кожен наступний рівень спирається на попередній. На початкових етапах учасники засвоюють базові поняття, класи атак, терміни, а також типові індикатори компрометації. На середніх рівнях вони застосовують знання в операційних процедурах, виконують триаж, розрізняють події безпеки та експлуатаційні аномалії,

здійснюють первинну локалізацію інциденту. На просунутих рівнях ключовим стає аналіз. Учасник вчиться корелювати сигнали з різних джерел, будувати часову лінію подій, висувати гіпотези та перевіряти їх, а також працювати з неповними даними. На рівні оцінювання з’являються елементи управління ризиками, коли необхідно обґрунтовувати пріоритети, оцінювати наслідки блокувань і вибрати стратегію реагування з урахуванням бізнес-критичності. Рівень створення формується тоді, коли учасник здатний проектувати правила детекції, писати плейбуки, вибудовувати архітектуру сегментації, планувати відновлення і розробляти комплексні політики безпеки.

Цикл Колба підсилює практичне навчання, оскільки робить його ітеративним. Практика починається з конкретного досвіду участі у сценарії, після чого необхідна рефлексія. Рефлексія має бути структурованою та відбуватися за принципом післядієвого аналізу. Учасники фіксують, що саме відбулося, які сигнали були ключовими, що було пропущено, які рішення виявилися помилковими та чому. Далі формується узагальнення, коли інструктор або команда перетворює події вправи на правила та патерни, які можна повторно застосувати. Завершальною фазою стає експериментування, коли сценарій повторюється з модифікаціями. Така модифікація може змінювати точку входу, техніку латерального руху, тип маскування, набір лог-джерел, обмеження в правах доступу або часові рамки. Саме повтор із варіативністю формує стійкі навички, а не одноразовий “успіх”.

Важливим елементом у кіберполігонах є командна педагогіка. У реальному середовищі фахівці працюють у ролях і з чіткими зонами відповідальності. Тому вправи повинні включати розподіл ролей, наприклад аналітик першої лінії, аналітик другої лінії, інцидент-менеджер, спеціаліст з форензики, threat hunter, адміністратор систем. Оцінювання має враховувати не лише технічний результат, а й якість координації та комунікації. У систематичних дослідженнях, присвячених адаптації програм кібернавчання, підкреслюється важливість

безперервного узгодження навчальних активностей з реальними вимогами організацій і ринку праці (Hatzivasilis et al., 2020).

Гейміфікація може підсилювати мотивацію, однак у науковому контексті вона має бути інструментом, а не метою. Практичним компромісом є використання балів і рівнів для підтримки залученості, але з акцентом на професійні артефакти. Такими артефактами виступають коректний звіт про інцидент, обґрунтований таймлайн, правильно сформована рекомендація з пом'якшення ризику, якісно написане правило детекції, коректна ескалація та документація. Підхід, що поєднує гейміфікацію і навчальну аналітику, детально розглядається у контексті платформ нового покоління (Nespoli et al., 2025).

3. Стандартизація компетенцій через фреймворк NICE

Кіберполігони цінні тим, що вони дозволяють оцінювати компетенції не через теоретичні відповіді, а через поведінку в середовищі, де розгортається інцидент. Для того щоб така оцінка була порівнюваною та релевантною вимогам ринку праці, необхідна стандартизація. NICE Framework, описаний у NIST SP 800-181r1, забезпечує структуру, яка поєднує робочі ролі, завдання, знання та навички у форматі, придатному для проєктування навчальних траєкторій (Petersen et al., 2020).

Практичний сенс інтеграції NICE у кіберполігон полягає в тому, що сценарії перестають бути випадковим набором задач. Кожна вправа починає відповідати конкретним завданням з каталогу ролей. Наприклад, для ролі аналітика кіберзахисту сценарій може вимагати ідентифікації аномалій у мережевому трафіку, кореляції подій між різними джерелами телеметрії, визначення ймовірного вектора атаки, класифікації інциденту та формування рекомендацій. Для ролі інцидент-респондера акцент переноситься на локалізацію, стримування, відновлення та комунікацію. Для ролі спеціаліста з оцінки вразливостей важливою стає методичність сканування, пріоритизація за ризиком, валідація, а також доказовість висновків.

У контексті систематичного огляду корисно розділяти оцінювання на три рівні. Перший рівень показує, чи виконана задача як результат. Другий рівень відображає, наскільки коректно побудований процес, включно з повнотою перевірок і якістю прийнятих рішень. Третій рівень демонструє швидкість та якість, що в кібербезпеці часто має вирішальне значення. Наприклад, час до першого коректного припущення або час до локалізації може бути не менш важливим за факт успішного завершення сценарію.

Додатковою перевагою NICE є можливість будувати персоналізовані траєкторії розвитку. Коли учасник систематично демонструє слабкість на певному типі завдань, наприклад у кореляції подій або у правильному визначенні “первинної точки компрометації”, полігон може пропонувати серію вправ, спрямованих саме на ці компоненти. Такий підхід збільшує ефективність навчання, оскільки замінює повтор цілого курсу на цільову роботу з прогалинами.

4. Автоматизація сценаріїв та роль агентного штучного інтелекту

Одним із центральних висновків практики впровадження кіберполігонів є те, що головною статтею витрат часто стає не інфраструктура, а створення і супровід сценарного контенту. Сценарій повинен бути правдоподібним, відтворюваним, контрольованим за складністю, безпечним, а також методично забезпеченим. Потрібно підготувати ін'єкцію подій, фонову активність, лог-джерела, критерії оцінювання та інструкції для викладача. Без автоматизації створення такого контенту стає тривалим і складним процесом.

Agentic RAG-підходи пропонують механізм, який переводить розробку вправ у напівавтоматичний режим. Агент отримує опис сценарію природною мовою, звертається до баз знань, підтягує шаблони топологій, образи хостів, типові конфігурації вразливостей, фрейми оцінювання та компоненти ін'єкції. Далі він генерує файли розгортання, скрипти налаштувань, а також перевіряє працездатність середовища. У науковому контексті підхід ARCeR демонструє цю логіку як механізм автоматизованого визначення кіберполігонів,

де агент не лише генерує, а й ітеративно виправляє помилки, забезпечуючи придатність середовища до використання (Lupinacci et al., 2025).

Разом з тим, систематичний огляд має включати критичний аналіз ризиків агентної автоматизації. Генеративні моделі можуть створювати некоректні конфігурації, підбирати неіснуючі параметри або помилково поєднувати несумісні компоненти. Додаткові ризики пов'язані з ланцюгом постачання, коли автоматично підтягуються сторонні образи або скрипти. У навчальних середовищах також існує ризик перенесення небезпечних технік за межі полігону. Тому найбільш практичним підходом є модель контролю з боку інструктора. Інструктор задає обмеження, політики безпеки, допустимі межі сценарію та критерії завершення, тоді як агент виконує рутинну частину розгортання та наповнення контентом.

Другий напрям сучасної автоматизації спирається на багатоагентне навчання з підкріпленням. У такому підході сценарій перестає бути фіксованим. Він стає змаганням автономних агентів, які можуть змінювати поведінку в реальному часі. Атакувальні агенти можуть бути агресивними, економними або прихованими, а захисні агенти навчаються будувати стратегію на основі спостережень. Дослідження, присвячені багатоагентним методам автономного кіберзахисту та ієрархічним моделям, підкреслюють, що такі підходи здатні підвищувати різноманітність і динамічність навчальних ситуацій (Kiely et al., 2025; Singh et al., 2025). Для освітнього контексту це означає, що учасники стикаються з більш реалістичною невизначеністю, а не з повторюваним набором скриптів.

Окремим фактором, що змінює вимоги до кіберполігонів, є поширення LLM у наступальних і захисних задачах. Генеративні моделі можуть посилювати фішингові кампанії, автоматизувати пошук вразливостей та прискорювати адаптацію тактик. Водночас вони можуть підтримувати захисників у пошуку кореляцій, підготовці правил детекції та документуванні. У дослідженнях,

присвячених Red і Blue teaming в епоху LLM, підкреслюється необхідність перегляду підходів до тренувань, оскільки суттєво змінюється тактичний ландшафт і швидкість ескалації атак (Abuadbba et al., 2023). Звідси випливає вимога до полігонів, які навчають не лише технікам, а й правильній взаємодії з ШІ, включно з перевіркою порад і контролем помилок.

5. Багатомодальна аналітика, оцінювання та ситуаційна обізнаність

Оцінювання у кіберполігоні має демонструвати реальну професійну готовність. Прості метрики на кшталт “виконано або не виконано” є недостатніми, оскільки вони не показують якості мислення та прийняття рішень. Сучасні платформи переходять до навчальної аналітики, яка збирає дані про процес виконання завдання. Приклади такого поєднання кастомізованих вправ, гейміфікації та навчальної аналітики описані для платформ нового покоління (Nespoli et al., 2025).

Найбільш корисними є кілька груп показників. Операційні показники відображають швидкість виявлення та реагування, а також темп переходу від первинних спостережень до коректних дій. Якісні показники демонструють точність класифікації інциденту, частку хибних висновків, повноту зібраних доказів і надійність побудованого таймлайну. Процесні показники дозволяють оцінити, чи діяв учасник методично, чи робив “стрибки” між непов'язаними гіпотезами, чи повторно перевіряв ключові припущення. Командні показники відображають розподіл ролей, узгодженість дій, правильність ескалації та якість комунікації. Показники стійкості демонструють, наскільки стабільним є результат при повторенні сценаріїв або при зміні умов.

Ситуаційна обізнаність є однією з ключових компетенцій у кіберзахисті. Вона включає здатність виявляти сигнали, інтерпретувати їх у контексті, а також прогнозувати наступні дії противника. У дослідженнях запропоновано підходи до формалізованого оцінювання ситуаційної обізнаності в кіберполігонах, зокрема через SASS, що дозволяє перевести оцінювання з

рівня інтуїції інструктора на рівень системних метрик (Damianou et al., 2024). Для освітніх програм це важливо, оскільки дозволяє порівнювати результати між групами та будувати корекційні траєкторії навчання.

Багатомодальна аналітика розширює оцінювання за рахунок поєднання технічної телеметрії з додатковими каналами даних. Біометричні показники можуть розглядатися як індикатори когнітивного навантаження та стресу під час виконання вправ. У навчальній логіці це може бути корисним для стрес-інокуляційних тренувань, коли метою є не покарання за “стрес”, а виявлення етапів сценарію, які призводять до когнітивних помилок, і побудова вправ для підвищення стійкості.

Етичні аспекти такого підходу потребують окремого підкреслення. Біометричні дані повинні збиратися за прозорою згодою та з мінімізацією, а також використовуватися як допоміжний сигнал. Стрес не є прямим еквівалентом некомпетентності, тому інтерпретація має бути обережною та багатofакторною.

6. Забезпечення безпеки, ізоляції та керованості навчального середовища

Кіберполігон є парадоксальним об’єктом. Він одночасно має бути максимально наближеним до реальності та максимально безпечним. У систематичному огляді важливо виділити технічні й організаційні механізми, які забезпечують такий баланс.

Ізоляція середовища реалізується через мережеву сегментацію, контрольовані шлюзи та політики виходу в інтернет. У багатьох випадках застосовується концепція “закритого контуру”, де інтернет-вихід або відсутній, або замінений на модельовані служби. Такий підхід зменшує ризик неконтрольованого поширення шкідливих дій. Керування доступом повинно базуватися на ролях та мінімальних привілеях, а також включати облік дій користувачів, що важливо і для безпеки, і для оцінювання.

Керованість також включає механізми швидкого відновлення. Після кожної вправи середовище має повертатися до контрольованого стану через снапшоти, повторне розгортання або автоматизоване

“очищення” компонентів. Відтворюваність виступає умовою справедливого оцінювання та об’єктивного порівняння результатів.

Для навчальних програм, які залучають різні групи або зовнішніх учасників, важливою стає мультиорендність. Вона забезпечує можливість запускати паралельні копії одного сценарію для різних команд без перетину трафіку, логів та впливу на результати. Це безпосередньо впливає на масштабування.

7. Інтеграція кіберполігонів у навчальні програми та організаційний життєвий цикл

Кіберполігон стає ефективним, коли він інтегрований у навчальну програму системно, а не епізодично. Практика показує, що найбільш результативним є підхід, у якому кіберполігон використовується як наскрізний інструмент від базових дисциплін до випускних проєктів. На початкових курсах він може застосовуватися для формування фундаментальних навичок у мережах, операційних системах, базовій криптографії, аналізі логів. На середніх курсах він підтримує дисципліни з інцидент-реагування, аналізу шкідливого ПЗ, захисту вебдодатків, безпеки хмарних середовищ. На старших курсах він стає платформою для командних навчань, капстон-проєктів, симуляцій SOC, а також для наближення студентів до реальних виробничих процедур.

Життєвий цикл впровадження зазвичай включає етап аналізу ролей, визначення компетенцій, вибір архітектури, створення бібліотеки сценаріїв, запуск з телеметрією, а потім безперервне вдосконалення. Безперервне вдосконалення є критичним, оскільки тактики атак змінюються, а навчальні матеріали без оновлення швидко втрачають актуальність. У цьому контексті автоматизація на основі IaC та агентних систем стає не просто технологічним бонусом, а способом підтримувати полігон у робочому стані без надмірного навантаження на команду викладачів.

8. Обмеження, ризики та дослідницькі прогалини

Попри очевидні переваги, кіберполігони мають обмеження, які необхідно враховувати у систематичному огляді. Один з ризиків

полягає у “CTF-ефекті”, коли учасники навчаються досягати короткострокової перемоги, але не формують процедурної дисципліни й документування. Цей ризик зростає тоді, коли оцінювання орієнтоване лише на результат і не враховує процес.

Інше обмеження пов’язане з тим, що якість навчання залежить від сценаріїв і методики, а не від платформи як такої. Навіть найкраща інфраструктура не забезпечить ефекту без добре спроектованих вправ, адекватного рівня складності, коректних критеріїв оцінювання та якісного післядієвого аналізу.

Підтримка полігона потребує ресурсів. Оновлення образів, сумісність агентів, зміни у версіях інструментів, патчинг, безпекові політики та контроль ізоляції формують постійне навантаження. Це створює потребу у чітких процесах експлуатації та у використанні автоматизованих інструментів розгортання і перевірки працездатності.

Дослідницькі прогалини часто пов’язані з валідацією метрик. Не всі показники, які легко зібрати, корелюють з реальною ефективністю фахівця на робочому місці. Тому перспективним напрямом є створення доказових моделей, які пов’язують результати вправ із професійною успішністю, а також розробка безпечних підходів до агентної генерації сценаріїв із формальними обмеженнями та перевіркою результатів.

ВИСНОВКИ

Кіберполігони еволюціонують від допоміжних тренажерів до центральних елементів стратегічного управління кіберризиками. Інтеграція Agentic RAG та MARL робить платформу здатною до саморозгортання та динамічної зміни сценаріїв атак, що критично важливо в умовах «ШІ-фікації» сучасних загроз. Поєднання технічного реалізму з глибокою педагогічною основою та об’єктивною аналітикою дозволяє трансформувати підготовку фахівців у формат безперервних «місійних репетицій». Такий підхід забезпечує не лише наявність теоретичних знань, а й високу психологічну та практичну готовність до протидії реальним кризам у цифровому просторі.

REFERENCES

1. **Abuadbba, A., Hicks, C., Moore, K., Mavroudis, V., et al.** (2023). From Promise to Peril: Rethinking Cybersecurity Red and Blue Teaming in the Age of LLMs. arXiv preprint arXiv:2506.13434v1.
2. **Agrawal, G., Kaur, A., & Myneni, S.** (2024). A Review of Generative Models in Generating Synthetic Attack Data for Cybersecurity. *Electronics*, 13(2), 322.
3. **Damianou, A., Mazi, M. S., Rizos, G., Voulgaridis, A., & Votis, K.** (2024). Situational Awareness Scoring System in Cyber Range Platforms. 2024 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR).
4. **Dalla Costa, A.** (2023). Development of a Cyber Range with description language for network topology definition (Master's thesis). University of Turku.
5. **Hatzivasilis, G., Ioannidis, S., Smyrlis, M., Spanoudakis, G., et al.** (2020). Modern Aspects of Cyber-Security Training and Continuous Adaptation of Programmes to Trainees. *Applied Sciences*, 10(16), 5702.
6. **Kiely, M., et al.** (2025). Exploring the Efficacy of Multi-Agent Reinforcement Learning for Autonomous Cyber Defence: A CAGE Challenge 4 Perspective. AAAI Conference on Artificial Intelligence.
7. **Lupinacci, M., Blefari, F., Romeo, F., Pironti, F. A., & Furfaro, A.** (2025). ARCeR: An Agentic RAG for the Automated Definition of Cyber Ranges. *Availability, Reliability and Security*, 23-40.
8. **Miller, E., Mink, D., Spellings, P., Bagui, S. S., & Bagui, S. C.** (2025). Classifying Cyber Ranges: A Case-Based Analysis Using the UWF Cyber Range. *Encyclopedia*, 5(4), 162.
9. **Nespoli, P., Albaladejo-González, M., Ruipérez-Valiente, J. A., & Garcia-Alfaro, J.** (2025). SCORPION Cyber Range: Fully Customizable Cyberexercises, Gamification, and Learning Analytics to Train Cybersecurity Competencies. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 15(67).
10. **Petersen, R., Santos, D., Smith, M. C., Wetzel, K. A., & Gitte, W.** (2020). Workforce Framework for Cybersecurity (NICE Framework). NIST Special Publication 800-181r1.
11. **Singh, A. V., Rathbun, E., Graham, E., Oakley, L., et al.** (2025). Hierarchical Multi-agent Reinforcement Learning for Cyber Network Defense. *Reinforcement Learning Journal*.
12. **Wen, D.** (2021). Automated Cyber Ranges: Design Features, Architectures, Scenarios and

Impacts (Undergraduate Honors Thesis). Brigham Young University.

Analysis of approaches to the implementation of cyber ranges in the training of cyber security specialists

*Maksym Delembovskyi, Sergiy Gnatyuk,
Borys Korniiichuk*

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of current strategies for the use of cyber ranges as intellectual platforms for the development of professional competencies in the field of cybersecurity. The study covers the evolution from static virtual laboratories to dynamic ecosystems based on cloud technologies and digital twins of real infrastructures. Particular attention is paid to the

integration of advanced pedagogical concepts, such as Bloom's taxonomy and Kolb's cycle, with the industry standards of the NICE framework. The paper examines in detail the role of automation through Retrieval-Augmented Generation (ARCeR) agent systems and multi-agent reinforcement learning (MARL), which allows for the creation of adaptive learning scenarios. The results of the study emphasize the importance of using multimodal analytics, including biometric stress monitoring, for an objective assessment of specialists' readiness to act in crisis situations.

Keywords: Cyber ranges, cyber defense, NICE framework, Bloom's taxonomy, RAG agent systems, multi-agent reinforcement learning, digital twins, situational awareness, scenario automation.

Аналіз можливості впровадження систем штучного інтелекту у судочинство України

Володимир Вишняков¹, Кирило Воронежський²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури,
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037,

¹ vyshniakov.vm@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4668-712X>,

² voronezhskiy_kv-2025@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-5855-7103>

Received 05.09.2025, accepted 26.11.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1202>

Анотація. У статті розглядаються випадки застосування систем штучного інтелекту (ШІ) у судочинстві на прикладі ключових сегментів кримінального правосуддя. У даному дослідженні застосовано комбінований метод аналізу статистики використання систем ШІ у судочинстві і інтерв'ю з юристами та експертами. Шляхом порівняння оцінок ефективності та індикаторів упередженості визначається, чи можуть системи на основі ШІ бути безпечними і нейтральними у судочинстві. Результати свідчать, що інтеграція ШІ скорочує час обробки даних та підвищує вірність призначення покарань. Проте виявлено відмінності у результатах для окремих демографічних груп, що свідчить про здатність ШІ відтворювати або підсилувати соціальну упередженість. Непрозорість алгоритмів і фрагментованість регуляторних підходів ставлять під загрозу довіру та підзвітність. Хоч ШІ має потенціал щодо підвищення ефективності і вірності кримінального правосуддя, але існують значні для судочинства проблеми, до яких в першу чергу слід віднести відсутність персональної відповідальності, упередженість та недосконалість регулювання. Усунення цих проблем дозволило б інтегрувати системи ШІ так, щоб вони сприяли справедливому, прозорому та чесному правосуддю. Особливу увагу у даному дослідженні приділено впровадженню в Україні Єдиної судової інформаційно-телекомунікаційної системи (ЄСІТС) та підсистеми «Електронний суд».

Крім того, досліджується використання автоматизованих систем аналізу даних у діяльності правоохоронних органів, а також захист персональних даних і дотримання стандартів справедливого суду в умовах воєнного стану.

Ключові слова: штучний інтелект (ШІ), кримінальне правосуддя, правові технології,



Володимир Вишук
доцент кафедри кібербезпеки та комп'ютерної інженерії, к.т.н., доц.



Кирило Воронежський
аспірант кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

призначення покарання, оцінка ризиків, процесуальна ефективність.

ВСТУП

Згідно Закону № 1401-VIII "Про внесення змін до Конституції України (щодо правосуддя)" від 02.06.2016 р. в Україні прийнято курс на гармонізацію судочинства з найкращими світовими практиками. Виконання цього Закону потребує не лише правових змін, а й технологічних інструментів, які здатні забезпечити прозорість і підзвітність процедур судочинства. Відомо, що корупційні практики суттєво впливають на довіру громадян до судової влади та якості законодавчого процесу. Штучний інтелект (ШІ) дозволяє автоматизувати аналіз великих обсягів правових текстів і судових рішень, виявляти колізії норм, підказувати релевантну практику, структурувати аргументацію та робити процес перевірки менш залежним від

SMART TECHNOLOGIES:

Industrial and Civil Engineering, Issue 4(17), 2025, 12-22

людського фактора. Йдеться не про заміну судді або законодавця, а про системи підтримки прийняття рішень із вбудованими гарантіями етики, безпеки, приватності, пояснюваності та контролю людиною. Поспішне прагнення запровадити універсальні рішення штучного інтелекту (ШІ) у сферах кримінального правосуддя вже спричинило широкий спектр дискусій щодо справедливості, підзвітності та правових стандартів у різних країнах. У міру того як інструменти на основі ШІ, включно з алгоритмами предиктивного аналізу, системами рекомендацій та інтелектуальним аналізом великих масивів даних, стають поширенішими, то все частіше науковці висловлюють занепокоєння їхнім впливом на існуючі правові принципи та права людини.

Для України ці процеси відбуваються паралельно з глибокою цифровою трансформацією публічних послуг (сервіси «Дія», електронний суд, дистанційні судові засідання), реформуванням судової системи та функціонуванням правосуддя в умовах воєнного стану. Питання допустимості й меж використання ШІ у кримінальному процесі накладаються на виклики забезпечення права на справедливий суд, доступу до правосуддя для внутрішньо переміщених осіб, роботи судів у прифронтових та деокупованих регіонах.

Попри зростання кількості досліджень, розуміння того, яким чином технології ШІ кидають виклик класичним концепціям кримінальної відповідальності, процесуальної справедливості та гарантіям прав людини, залишається неповним. Особливо це стосується перехідних правових систем, до яких належить Україна, де, з одного боку, слід орієнтуватись на стандарти ЄС, а з іншого — забезпечувати правосуддя в умовах збройної агресії, посиленого навантаження на правоохоронну систему та високого суспільного запиту на безпеку.

Метою даної роботи є виявлення потенційних проблем, які можуть заважати впровадженню систем штучного інтелекту у судочинство України.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Взаємодія ШІ та кримінального правосуддя розглядається такою, що може мати трансформаційний стиль, але разом з цим ризиковий характер. Наприклад, у роботі [1] досліджуються наслідки застосування систем ШІ у кримінальному правосудді та їхній потенційний вплив на основні права людини. Питання впровадження ШІ у судочинстві досліджується у роботах [2 - 4], де надаються оцінки впровадженню ЄСІТС та застосуванню інтелектуальних систем за умов збереження гарантій змагальності, безпосередності дослідження доказів і права на захист. Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України №1556-р від 2 грудня 2020 року) визначає безпековий і правовий вимір використання ШІ як один із пріоритетних напрямів державної політики.

За останні десять років, у зв'язку зі зростанням використання штучного інтелекту (ШІ) у системах кримінального правосуддя, з'явилася велика кількість наукових праць, присвячених його потенційним перевагам, викликам та правовим наслідкам. Частина досліджень фокусується на системах ризик-скорингу та алгоритмах винесення вироків у США та Західній Європі [1, 5 - 6], інші — на загрозах правам людини та доступу до правосуддя [7 - 9]. Багато з цих науковців звертають увагу на практичні та правові труднощі, пов'язані з інтеграцією ШІ у кримінальне провадження.

Важливий пласт становлять праці, присвячені нормативним прогалинам, де наголошується на розбіжність між національними та міжнародними підходами до судочинства [10]. У роботі [11] підкреслюється необхідність механізмів прозорості і підзвітності, а у роботі [12] — важливість взаємодії юристів з розробниками систем ШІ.

Українські дослідження приділяють значну увагу не стільки «класичному» ШІ в кримінальному правосудді, скільки ширшій цифровізації, електронному документообігу, а також впровадженню ЄСІТС і електронного суду. Аналітичні матеріали Проекту ЄС

«Pravo-Justice» показують, що ЄСІТС розглядається як інструмент підвищення ефективності роботи судів, прозорості та доступності правосуддя [13].

У роботі [2] окреслено ключові правові принципи застосування систем ШІ у кримінальному процесі, акцентуючи увагу на необхідності узгодження таких систем із конституційними гарантіями, а також із Законом України «Про захист персональних даних» [14]. У роботі [2] аналізуються практичні можливості використання інтелектуальних систем у кримінальному провадженні, наголошуючи, що відсутність чітких процесуальних рамок може поставити під загрозу допустимість доказів. У роботі [4] досліджується цифровізація кримінального процесу й підкреслюється відсутність єдиного стандарту щодо публічності інформації та прозорості алгоритмічних рішень.

Концепція розвитку штучного інтелекту в Україні додатково підкреслює необхідність розвитку ШІ в секторі «Право, безпека, оборона», але робить це, радше, на стратегічному рівні, не деталізуючи процесуальні гарантії для кримінального процесу [15]. У підсумку українська література фіксує те саме, що й міжнародні дослідження, а саме відсутність стандартизованих регуляторних рамок, недооцінка довгострокових соціальних наслідків та постійні проблеми з упередженістю й справедливістю.

МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному дослідженні застосовано міждисциплінарний підхід, спрямований на аналіз впливу штучного інтелекту на правову систему у контексті кримінального правосуддя. Обрана методологія поєднує збір та аналіз як якісних, так і кількісних даних.

Основою якісної частини дослідження є розширені інтерв'ю з 40 представниками юридичної сфери: судьями, прокурорами, адвокатами, законотворцями та фахівцями з цифрових рішень. Частина респондентів представляла Україну. Опитувалися судді загальних та апеляційних судів, прокурори, адвокати, які активно працюють з

підсистемою «Електронний суд» та беруть участь у пілотних цифрових проєктах судової влади. Мета опитування полягала у виявленні практичних наслідків застосування ШІ та інтелектуалізованих цифрових інструментів (скоринг, автоматичне формування документів, пошук практики), а також етичні, моральні й юридичні проблеми, що виникають під час інтеграції алгоритмічних систем у кримінальне судочинство.

Кількісна частина базується на статистичному аналізі 500 судових справ, у яких застосовувалися інструменти штучного інтелекту або наближені до них технології, а саме системи оцінки ризику, рекомендації алгоритмів щодо призначення покарання, інтелектуальний аналіз транзакцій та цифрових слідів. До вибірки включено також 100 справ українських судів, у яких ключову роль відігравали автоматизовані процедури щодо розподілу справ, електронний документообіг, інтеграція з реєстрами, аналіз фінансових операцій у справах про корупційні та економічні злочини (зокрема з використанням спеціалізованого програмного забезпечення органів досудового розслідування).

Статистична обробка включала розрахунок описових показників, t-тестів, χ^2 -тестів та побудову регресійних моделей для порівняння результатів у справах із використанням ШІ та без нього.

Проведене дослідження має порівняльно-правовий характер і охоплює чотири групи юрисдикцій: США, окремі держави Європейського Союзу, Україну та низку інших країн континентальної правової традиції. Порівняння законодавства, політичних документів (зокрема Концепції розвитку ШІ в Україні [16]), судових рішень та доктринальних позицій дозволило оцінити стан правових норм, присвячених або пов'язаних з інтеграцією ШІ, та виявити специфіку української моделі, що розвивається під впливом і європейських, і національних пріоритетів.

Аналітична модель дослідження поєднує тематичний аналіз якісних даних, статистичні методи аналізу кількісних результатів та порівняльно-правовий підхід. Основну гіпотезу сформульовано так: впровадження

інструментів ШІ у процесі кримінального правосуддя підвищує їхню процедурну ефективність, але водночас породжує істотні правові та етичні проблеми, зокрема щодо підзвітності, справедливості та прозорості.

Дана гіпотеза перевіряється, як на глобальному рівні, так і у фокусі українського досвіду, де цифровізація судочинства поки що переважає над «чистими» системами ШІ, але вже створює схожі виклики, пов'язані з автоматизованим аналізом персональних даних, алгоритмізацією управлінських рішень і «чорними скриньками» програмних комплексів.

Для повного аналізу питань, що стали предметом дослідження, було використано кілька рівнянь і моделей. Основні математичні формули містять параметр, що являє собою відхилення тривалості покарання, яке описується виразом

$$\Delta T_s = T_{AI(ШІ)} - T_{Manual} , \quad (1)$$

де $T_{AI(ШІ)}$ — середня тривалість покарання у справах із застосуванням ШІ;

T_{Manual} — середня тривалість покарання за традиційних підходів.

Ця формула дозволяє оцінити зміни ефективності, зумовлені використанням систем ШІ.

Коефіцієнт зміщення оцінки ризику знаходився з виразу

$$B_r = \frac{P_{FalsePositive} - P_{FalseNegative}}{P_{TotalDecisions}} , \quad (2)$$

де $P_{FalsePositive}$ — частка неправильних оцінок високого ризику;

$P_{FalseNegative}$ — частка неправильних оцінок низького ризику;

$P_{TotalDecisions}$ — загальна кількість рішень з ризиками, прийнятих системою ШІ.

Цей коефіцієнт характеризує кількісну міру зміщення оцінки ризику.

Індекс порівняльної відповідності CCI (Comparative Compliance Index) було знайдено з виразу

$$CCI = \frac{L_{Adapted}}{L_{Established}} , \quad (3)$$

де $L_{Adapted}$ — кількість адаптованих правових баз даних, які безпосередньо стосуються використання штучного інтелекту;

$L_{Established}$ — загальна кількість переглянутої існуючої законодавчої бази даних.

Цей індекс вказує на рівень регуляторної адаптації в різних юрисдикціях.

Для аналізу статистичної значущості різниць в результатах застосовувалися дисперсійний аналіз (ANOVA) та регресійні моделі. Якісні дані були закодовані відповідно до методики тематичного аналізу [17 - 18]. Крім того, порівняльно-правовий підхід дозволив виявити прогалини та відмінності у нормативному регулюванні ШІ між різними юрисдикціями та визначити рекомендації для вдосконалення правових режимів.

Усі етапи збирання даних відповідали етичним вимогам: учасники інтерв'ю надали поінформовану згоду, а всі відповіді були анонімізовані. Обмеження дослідження пов'язано із залежністю від відкритих джерел даних, які не завжди повністю відображають практику застосування ШІ. Крім того, вибірка інтерв'ю, хоча й достатня для якісного аналізу, але може обмежувати можливість повного узагальнення результатів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Застосування штучного інтелекту в системі кримінального правосуддя в алгоритмах прогнозування та винесення вироків стало надійним джерелом для прискорення процесів та поліпшення прийняття рішень. Однак питання його точності, прозорості та справедливості є предметом постійних дискусій.

У США та низці держав ЄС такі системи вже прямо впливають на результати у кримінальних справах, тоді як у Китаї та деяких інших країнах більше уваги приділяється централізованим платформам для аналізу великих даних.

Хоч системи ІІІ розроблялися з метою забезпечення більш об'єктивного та послідовного ухвалення рішень, але результати дослідження показують, що вони можуть відтворювати, а інколи й посилювати структурну соціальну упередженість. Це пов'язано з тим, що моделі навчаються на історичних даних, які вже містять сліди дискримінації. У Таблиці 1 показано розбіжності в оцінках ризику за демографічними групами у США.

Така різниця означає, що певні групи частіше піддаються завищеним оцінкам ризику, що прямо впливає на запобіжні заходи, строк покарання та інші елементи кримінального провадження. Для іспаномовного населення зафіксовано зменшення частки високоризикових класифікацій, але зростання частки хибнонегативних рішень. Це свідчить про порушення балансу у класифікації, коли алгоритми недооцінюють ризик щодо одних

Таблиця 1. Розбіжності в оцінках ризику за демографічними групами у США
Table 1. Differences in risk estimates by demographic group in the US

	Африканські американці	Іспанські американці	Кавказькі американці	Азіатські американці	Корінні американці
Частка рішень з високим ризиком без використання систем зі ІІІ	30%	25%	40%	35%	20%
Частка рішень з високим ризиком із використанням систем зі ІІІ	35%	22%	45%	38%	18%
Частка рішень з хибним негативним результатом без використання систем зі ІІІ	20%	10%	25%	22%	15%
Частка рішень з хибним негативним результатом із використанням систем зі ІІІ	15%	12%	20%	19%	16%
Зміна кількості рішень з високим ризиком	+16,67%	-12,00%	+12,50%	+8,57%	-10,00%
Зміна кількості рішень з хибним негативним результатом	-25,00%	+20,00%	-20,00%	-13,62%	+6,67%

З даних, які наведено у Табл. 1 бачимо, що рівень “високого ризику” зріс серед представників деяких демографічних груп, хоч для всіх груп не було змін у відсотковому рівні хибнопозитивних результатів. Зокрема: серед африканських американців рівень віднесення до категорії високого ризику збільшився на 16,67%, а серед представників білого населення — на 12,50% з істотно вищим показником хибнопозитивних результатів.

груп і переоцінюють його щодо інших. Серед азійсько-американських груп спостерігалось невелике зростання хибнопозитивних класифікацій та помірне зменшення хибнонегативних, що також вказує на системні перекося. Загалом результати демонструють: упередженість у алгоритмічних оцінках є системною і проявляється по-різному залежно від демографічної групи. Це створює суттєві

загрози як для рівності перед законом, так і для суспільної довіри до систем ШІ.

Поява технологій ШІ суттєво вплинула на різні аспекти нашого повсякденного життя, зокрема у тих сферах, де статистично обґрунтована потреба у швидкому реагуванні. Значною мірою ШІ сприяв автоматизації ключових процесів, судочинства, включно з аналізом доказів, оцінкою ризиків та формуванням рекомендацій щодо призначення покарання.

для виконання цих етапів, і водночас дає можливість правникам зосередитися на діяльності з більшою доданою вартістю.

Ключові фактори ефективності та питання підзвітності на різних етапах судового процесу наведено у Таблиці 2.

крокам юридичної процедури у єдиний спосіб.

Навіть після зазначеного підвищення ефективності, останні результати підтвердили, що проблеми відповідальності залишаються дуже значними. Проведені інтерв'ю також висвітлили проблему визначення відповідальності у випадку помилок, пов'язаних із алгоритмами. Юристи висловлюють занепокоєння щодо відсутності прозорості у способі, яким системи ШІ формують оцінки ризику або пропозиції щодо покарання. Більшість респондентів зазначили, що навіть якщо підвищення ефективності є суттєвим, воно має досягатися без шкоди для точності прийняття рішень, забезпечення справедливого процесу та права

Таблиця 1. Ключові фактори ефективності та питання підзвітності на різних етапах судового процесу
Table 2. Key factors of effectiveness and accountability issues at different stages of the judicial process

Етап процесу	Чинник підвищення ефективності	Питання відповідальності
Попередній аналіз доказів	Автоматизоване вилучення даних, швидше індексування	Нестача контролю на етапі початкової обробки даних ШІ
Оцінка ризиків	Автоматизоване оцінювання ризиків, оновлення даних в режимі реального часу	Складність визначення відповідальності за некоректні оцінки
Рекомендації щодо покарання	Алгоритмічна узгодженість у застосуванні керівних принципів	Обмеження розуміння логіки та алгоритму
Остаточна документація справи	Автозаповнення даних справи, використання шаблонів	Питання точності даних та прозорості
Розгляд апеляцій	Швидший доступ до прецедентів справ	Невизначеність щодо рішень апеляцій, які були прийняті ШІ

Впровадження штучного інтелекту демонструє значний вплив на час обробки на всіх досліджуваних етапах, найбільш вираженим є ефект у оцінці ризиків (+57%). Це пояснюється тим, що системи ШІ здатні опрацьовувати складні фактори ризику та великі обсяги даних у режимі реального часу, що пришвидшує прийняття рішень. Останній етап – документація справи – також зазнав трансформації, оскільки стало можливим скоротити час обробки на 40% завдяки автоматизованому введенню даних та використанню стандартних шаблонів звітності. Менші, але все ж відчутні, покращення спостерігалися у рекомендаціях щодо покарання та обробці апеляцій, що свідчить про те, що ШІ може сприяти всім

на апеляцію. Ці висновки підкреслюють необхідність поєднувати ефективне застосування ШІ з надійними механізмами контролю, щоб зміцнити довіру та забезпечити відповідальність у всій системі кримінального правосуддя.

В Україні станом на час дослідження повноцінні системи ШІ у сфері призначення покарань або оцінки ризику офіційно не застосовуються, однак активно впроваджується комплексна цифрова інфраструктура: ЄСІТС, підсистема «Електронний суд», електронний кабінет і відеоконференції [17]. Ці системи самі по собі ще не є ШІ, але створюють передумови для подальшої інтеграції інструментів машинного навчання (наприклад, аналізу завантаженого масиву судових рішень, типових

процесуальних документів). Вони вже зараз містять елементи автоматизованого прийняття рішень (автоматичний розподіл справ, шаблонізація процесуальних документів, автоматичне формування повідомлень та викликів) і оперують великими масивами персональних даних, що підпадають під дію Закону України «Про захист персональних даних» [19] і вимагають посиленних гарантій безпеки та прозорості.

У ході інтерв'ю українські судді й адвокати відзначали як очевидні переваги (скорочення строків розгляду окремих категорій справ, полегшення доступу до матеріалів, можливість дистанційної участі), так і ризики, а саме технічні збої, нерівний доступ до цифрових сервісів, відсутність зрозумілої процедури оскарження результатів автоматизованих дій (наприклад, помилкового адресування процесуальних документів через збій у системі).

Таким чином, навіть без повноцінних «суддівських алгоритмів» Україна вже стикається з типовими для ІІІ проблемами: непрозорістю логіки роботи цифрових систем, концентрацією влади в руках розробників та адміністраторів і необхідністю встановити чіткі правила відповідальності за помилки програмного забезпечення.

Аналіз змін у тривалості покарань до та після впровадження алгоритмічних систем у досліджуваних юрисдикціях показав загальне зменшення варіативності вироків, особливо у справах щодо неповнолітніх та ненасильницьких злочинів. Проте інтерв'ю свідчать, що стандартизація не завжди означає справедливість. Судді та адвокати наголошують на небезпеці «підміни» суддівського розсуду технократичною логікою, яку важко пояснити сторонам і перевірити в апеляційному порядку.

В українському контексті подібні дилеми проявляються насамперед через залежність від закритих програмних продуктів, які створені приватними розробниками для правоохоронних органів чи судів, без належної експертизи їх відповідності процесуальним стандартам. Також існують прогалини у законодавстві щодо статусу

звітів, сформованих автоматизованими системами (наприклад, в антикорупційних або фінансових розслідуваннях). Виникають питання: чи є вони доказами, оперативною інформацією або допоміжним інструментом для слідчого.

У міжнародних системах оцінки ризику (зокрема в США) зафіксовано значні відмінності в оцінках для різних демографічних груп: певні групи отримують статус «високого ризику» частіше навіть за схожих фактичних обставин справи. Це пов'язано з навчанням моделей на історичних даних, які вже містять сліди дискримінації.

Для України специфіка полягає не стільки в расових, скільки в соціальних та регіональних відмінностях. Інтерв'ю з адвокатами і правозахисниками показали занепокоєння щодо потенційного профайлінгу внутрішньо переміщених осіб, мешканців прифронтових територій чи територій, що тривалий час перебували в окупації. Також є можливість стигматизування певних груп військовослужбовців (наприклад, тих, хто вже має судимість), якщо відповідні дані використовуватимуться у автоматизованих оцінках ризику. Ці занепокоєння свідчать про необхідність запровадження систем ризик-скорингу. Україна має закласти в нормативну базу гарантії проти дискримінаційного використання даних, а також чітко визначити критерії, за якими алгоритми можуть «сегментувати» населення. Без цього інтеграція ІІІ загрожує посиленням вже наявних соціальних нерівностей.

Як показали дані, у всіх досліджуваних юрисдикціях застосування ІІІ та інтелектуалізованих цифрових рішень суттєво скоротило час обробки справ, особливо на етапах попереднього аналізу доказів і оцінки ризику. У середньому ефективність зростала на 30–60 %, залежно від типу справ і використовуваних систем.

В Україні аналогічний ефект демонструє впровадження дистанційного подання скарг та клопотань, а також електронний обмін документами між сторонами й судом, але виникає питання про відповідальність за помилки у програмних алгоритмах (наприклад, якщо система не надіслала

повіді чи неправильно відобразила дату засідання).

Відповіді на ці питання поки що фрагментарні й ґрунтуються на загальних положеннях про відповідальність держави та судову практику, яка лише формується. Саме тому, попри відчутне підвищення ефективності, ШІ та пов'язані з ним технології вимагають розбудови спеціальних механізмів контролю, аудиту та відповідальності, без яких довіра до системи кримінального правосуддя може бути підірвана.

Порівняння підходів різних юрисдикцій щодо застосування ШІ в кримінальному правосудді, на прикладі США, ЄС, Канади, Китаю, Великої Британії та України, надано у Таблиці 3. Як витікає з аналізу, жодна з розглянутих юрисдикцій не має на сьогодні повністю завершеної комплексної системи ШІ у кримінальному правосудді. ЄС рухається у напрямі запровадження високоризикового статусу для систем ШІ, що застосовуються в правоохоронній та судовій сферах, але механізми імплементації ще формуються. США покладаються на мозаїку штатних і федеральних принципів, Китай — на централізовані політики, Велика Британія — на м'яке право.

Україна вирізняється тим, що має стратегічний документ щодо розвитку ШІ [16], базовий закон про захист персональних даних [19] та розвинену інфраструктуру судової цифровізації (ЄСІТС, електронний суд), але відсутня спеціальна процесуальна регламентація статусу алгоритмів для систем ШІ. Також не має обов'язкових вимог до пояснюваності та аудиту алгоритмів, які можуть впливати на права учасників кримінального провадження. Не закріплена процедура оскарження рішень, прийнятих із використанням ШІ або автоматизованих систем аналізу даних. Це створює ризик, що практичне використання технологій ШІ випереджатиме нормативну базу, а судова практика буде змушена заповнювати прогалини *casu by case*, без системного підходу.

ВИСНОВОК

Для аналізу можливості впровадження систем штучного інтелекту у судочинство України застосовано міждисциплінарний змішаний підхід, який поєднує збір та аналіз якісних і кількісних даних. Якісною частиною даних дослідження є розширені інтерв'ю з представниками юридичної сфери: суддями, прокурорами, адвокатами, законотворцями та фахівцями з цифрових рішень. Кількісна частина базується на статистичному аналізі судових справ, у яких застосовувалися інструменти штучного інтелекту або наближені до них технології.

Сформульовано гіпотезу даного дослідження, яка проголошує, що впровадження інструментів ШІ у процеси кримінального правосуддя підвищує їхню процедурну ефективність, але водночас породжує істотні правові та етичні проблеми, зокрема щодо підзвітності, справедливості та прозорості. Ця гіпотеза перевіряється як на глобальному рівні, так і у фокусі українського досвіду, де цифровізація судочинства поки що переважає над «чистими» системами ШІ, але вже створює схожі виклики, які пов'язані з автоматизованим аналізом персональних даних, алгоритмізацією управлінських рішень і «чорними скриньками» програмних комплексів.

Показано, що застосування ШІ в системі кримінального правосуддя стало надійним джерелом прискорення процесів та поліпшення прийняття рішень, але питання точності, прозорості та справедливості цих рішень є предметом постійних дискусій.

У всіх досліджуваних юрисдикціях застосування ШІ та інтелектуалізованих цифрових рішень суттєво скоротило час обробки справ, особливо на етапах попереднього аналізу доказів і оцінки ризику. В Україні аналогічний ефект демонструє впровадження дистанційного подання скарг та клопотань, а також електронний обмін документами між сторонами й судом, але виникає питання про відповідальність за помилки у програмних алгоритмах. Відповіді на ці питання поки що фрагментарні й ґрунтуються на загальних положеннях про відповідальність держави.

Таблиця 3. Порівняння адаптації юрисдикцій до інтеграції штучного інтелекту в кримінальне правосуддя

Table 3. Comparing jurisdictions' adaptation to integrating artificial intelligence into criminal justice

Юрисдикція	Наявна нормативно-правова база	Ключові юридичні зміни	Виявлені прогалини	Рівень прозорості стандартів	Основні зацікавлені сторони
Сполучені Штати	Часткова	Керівні принципи щодо використання інструментів ризику	Відсутність стандартизованого механізму відповідальності	Помірний	Законодавчі органи штатів, Мін'юст США, НУО
Юрисдикція	Наявна нормативно-правова база	Ключові юридичні зміни	Виявлені прогалини	Рівень прозорості стандартів	Основні зацікавлені сторони
Європейський Союз	Нова	Етичні принципи ШІ, вимоги до прозорості, проєкт/ухвалення AI Act	Відсутність єдиного механізму виконання в державах-членах	Високий	Єврокомісія, уряди членів-держав, Європейський парламент
Канада	Ранній етап	Пілотні програми в досудових оцінках	Відсутність обов'язкових етичних стандартів	Низький	Провінційні уряди, правоохоронні органи
Китай	Просунута	Національні рекомендації щодо етичного використання ШІ	Обмежені механізми публічної відповідальності	Помірний	Міністерство громадської безпеки, держ. НДІ
Велика Британія	Часткова	Добровільні стандарти, ініціативи щодо прозорості	Відсутність юридично обов'язкової бази	Помірний	Парламент, судова система, приватні розробники
Україна	Фрагментарна	Концепція розвитку ШІ (2020), поетапне впровадження ЄСІТС, Закон «Про захист персональних даних»	Відсутність спеціального закону про ШІ, чітких правил застосування алгоритмів у кримінальному процесі, процедурного статусу автоматизованих рішень	Низький–помірний (висока формальна відкритість судових рішень, але закритість програмних алгоритмів)	Верховна Рада України, Кабінет Міністрів, Вища рада правосуддя, суди, Офіс Генерального прокурора, розробники ІТ-рішень

Таким чином попри відчутне підвищення ефективності, III та пов'язані з ним технології вимагають розбудови спеціальних механізмів контролю, аудиту та відповідальності, без яких довіра до системи кримінального правосуддя може бути підірвана.

REFERENCES

1. **Završnik A.** (2020) Criminal justice, artificial intelligence systems, and human rights. ERA Forum, 2020. 20: p. 567–583.
2. **Plakhotnik O.** (2019) Practical use artificial intelligence in criminal proceeding. Herald of criminal justice, 2019.
3. **Huang H.** (2019) Analysis on the Criminal Subject of Artificial Intelligence. In: Data Processing Techniques and Applications for Cyber-Physical Systems. 2019.
4. **Wan S.** (2024) Research on position of weak artificial intelligence in criminal law. Science of Law Journal, 2024.
5. **Lopashenko N.A., E.V. Kobzeva and Rozhavskiy Z.D.** (2024) Artificial Intelligence in the Context of Criminal Law Risks. Proceedings of Southwest State University. Series: History and Law, 2024.
6. **Riega-Virú, Y., et al.** (2023) Artificial Intelligence and Criminal Justice: A systematic review of the scientific literature. LACCEI, 2023.
7. **Vargas-Murillo, A.R., et al.** (2024) Transforming Justice: Implications of Artificial Intelligence in Legal Systems. Academic Journal of Interdisciplinary Studies, 2024.
8. **Tua Situmeang, S.M., et al.** (2024) The Role of Artificial Intelligence in Criminal Justice. Global International Journal of Innovative Research, 2024.
9. **Kaplina O., Krytska I. and O. Verkhoglyad-Gerasymenko** (2023). Application of Artificial Intelligence Systems in Criminal Procedure: Key Areas, Basic Legal Principles and Problems of Correlation with Fundamental Human Rights. Access to Justice in Eastern Europe, 2023. 3(20): p. 147–166.
10. **Xavier Januário, T.F.** (2023) Artificial Intelligence in Criminal Proceedings. Revista Mexicana de Ciencias Penales, 2023.
11. **Dachlan, S.N., D.E.S. Karauwan, and N. Lahangatubun** (2024) The Role of Artificial Intelligence in Law Enforcement: Towards a More Accurate and Efficient Justice System. Sinergi International Journal of Law, 2024.
12. **Yan, Q.** (2023) Legal Challenges of Artificial Intelligence in the Field of Criminal Defense. Lecture Notes in Education Psychology and Public Media, 2023.
13. **Lei W.** (2019) Legal Risk and Criminal Imputation of Strong Artificial Intelligence. 2019.
14. **Verkhovna Rada of Ukraine** (2025) On the protection of personal data. Document 2297-VI, — Editorial from 14.06.2025, basis - 4240-IX .
15. **Cabinet of Ministers of Ukraine** (2020) Concept of development of artificial intelligence in Ukraine (Order KMU from 02.12.2020 №1556-p).
16. **High Council of Justice** (2024) EU project “Support to justice reforms in Україні (PRAVO-JUSTICE III)».
17. **Kanwel S., M. Imran Khan, and M. Usman** (2023) From Bytes to Bars: The Transformative Influence of Artificial Intelligence on Criminal Justice. Qlantic Journal of Social Sciences, 2023.
18. **Bharati R.K.** (2024) Ethical Implications of AI in Criminal Justice: Balancing Efficiency and Due Process. RESEARCH REVIEW International Journal of Multidisciplinary, 2024.

Analysis of the possibility of introducing artificial intelligence systems into the judiciary of Ukraine

Volodymyr Vyshniakov, Kyrylo Voronezhskyy

Abstract. The article examines the use of artificial intelligence (AI) systems in the judiciary using key segments of criminal justice. This study uses a combined method of analyzing statistics on the use of AI systems in the judiciary and interviews with lawyers and experts. By comparing performance ratings and bias indicators, it is determined whether AI-based systems can be safe and neutral in the judiciary. The results show that the integration of AI reduces data processing time and increases the accuracy of sentencing. However, differences in results were found for certain demographic groups, which indicates the ability of AI to reproduce or reinforce social bias. The opacity of algorithms and the fragmentation of regulatory approaches threaten trust and accountability. Although AI has the potential to increase the efficiency and accuracy of criminal justice, there are significant problems for the judiciary, which primarily include the lack of personal responsibility, bias, and imperfect regulation. Addressing these issues would allow AI systems to be integrated in a way that promotes fair, transparent, and honest justice. This study focuses on the implementation of the Unified Judicial

Information and Telecommunications System (JITS) and the Electronic Court subsystem in Ukraine.

In addition, the use of automated data analysis systems in law enforcement activities is being investigated, as well as the protection of personal data

and compliance with fair trial standards in martial law.

Keywords: artificial intelligence (AI), criminal justice, legal technologies, sentencing, risk assessment, procedural efficiency.

Застосування нечіткої логіки для підвищення стійкості біометричної ідентифікації в системах прокторингу

Євгенія Шабала¹, Борис Корнійчук², Сергій Палій³

^{1,2} Київський національний університет будівництва і архітектури
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037,

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська, 60, м.Київ, 01033,

¹ shabala.ieie@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0428-9273>,

² korniichuk.bv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3881-1581>,

³ sergiy.paliy@knu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9742-1116>

Received 03.11.2025; Accepted 15.12.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1203>

Анотація. У статті розглядається необхідність впровадження математичного апарату нечітких множин для підвищення надійності біометричної ідентифікації обличчя в системах автоматизованого прокторингу в умовах екзаменаційного центру. Звертається увага на те, що зовнішнє середовище є нестабільним (освітлення, тіні, відхилення ракурсу). Це призводить до деградації точності класичних бінарних алгоритмів і збільшення частоти помилкової відмови.

Пропонується поєднання нечіткої логіки для обробки невизначеності вхідних даних. Здійснюється перетворення об'єктивних метрик якості кадру на лінгвістичні змінні ("освітлення", "ракурс") із побудовою відповідних функцій приналежності. В результаті роботи нечіткої системи, сформованої на базі правил із застосуванням Мамдані-алгоритму, отримується коефіцієнт довіри ідентифікації (КДІ). Наводиться приклад застосування КДІ для динамічної корекції порогу верифікації. Це забезпечує гнучке прийняття рішень та підвищує надійність системи прокторингу.

Ключові слова: нечіткі множини, прокторинг, ідентифікація обличчя, коефіцієнт довіри ідентифікації, дефазифікація.

ВСТУП

Сучасний розвиток освіти та професійної сертифікації, включаючи масове тестування (наприклад, НМТ/ЗНО, ЄДКІ), вимагає впровадження високоточних та надійних механізмів контролю ідентичності здобувачів. Гарантування академічної доброчесності та валідності результатів

SMART TECHNOLOGIES:

Industrial and Civil Engineering, Issue 4(17), 2025, 23-31



Євгенія Шабала
доцент кафедри кібербезпеки
та комп'ютерної інженерії



Борис Корнійчук
доцент кафедри професійної
освіти



Сергій Палій
доцент кафедри інформаційних
систем та технологій

іспитів забезпечується системами прокторингу, ключовим елементом яких є біометрична верифікація особистості.

Метод розпізнавання обличчя (Face Recognition) є найбільш затребуваним для прокторингу, оскільки він забезпечує неперервний, неінвазивний моніторинг учасника іспиту. Проте, застосування цієї технології в реальних умовах екзаменаційних центрів стикається з низкою критичних викликів. На відміну від лабораторних умов, екзаменаційний центр характеризується нестабільністю вхідних даних, такими як динамічне освітлення та тіні, низька якість відео, зміна ракурсу та

рух (Рис. 1). Такі чинники суттєво підвищують ризик виникнення помилок у роботі автоматизованих систем, що робить процес верифікації даних значно складнішим порівняно з контрольованим середовищем.



Рис.1. Особливості екзаменаційного центру
Fig. 1. Features of the examination center

Класичні алгоритми ідентифікації працюють із "чіткими" даними, де рішення приймається за бінарним принципом (ідентифіковано/не ідентифіковано). Наявність перелічених вище на малюнку перешкод призводить до деградації точності, збільшуючи ймовірність помилкового відхилення справжнього користувача (FRR) або, що критичніше, помилкового прийняття іншої особи (FAR).

Таким чином, виникає потреба у розробці такого математичного апарату, який здатен ефективно обробляти невизначеність та нечіткість вхідної інформації. Теорія нечітких множин пропонує потужний інструментарій для кількісного представлення лінгвістичних змінних ("погане освітлення", "високий рівень шуму"). Інтеграція апарату нечіткої логіки дозволить створити робастну (стійку) модель прийняття рішень, яка трансформує неточні дані про навколишнє середовище в надійний коефіцієнт довіри ідентифікації

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

За принципом дії біометричні методи ідентифікації поділяються на статичні (за ознаками, даними людині з народження), динамічні (за ознаками, що набуті в процесі існування) та комбіновані (поєднання двох перших). Фізіологічні (статичні) методи біометричної ідентифікації:

- сканування райдужної оболонки ока;
 - сканування сітківки ока;
 - сканування рисунку вен долоні;
 - геометрія кисті руки (відбитки пальців – дактилоскопія, розмір, довжина і ширина долонь);
 - розпізнавання рис обличчя (контур, форма; розташування очей і носа);
 - структура ДНК-сигнатури.
- Поведінкові (динамічні) методи;
- аналіз підпису (форма букв, манера письма, натиск);
 - аналіз тембру голосу;
 - аналіз клавіатурного почерку тощо [1, 2].

Саме до категорії статичних біометричних систем, що використовують вроджені фізичні характеристики, належить технологія Face Recognition (розпізнавання обличчя), яка використовує унікальну геометрію та текстуру обличчя для ідентифікації особи.

1. Виявлення обличчя. На цьому етапі система визначає, чи є обличчя на зображенні або у відеопотоці, і де саме воно розташоване. Для локалізації використовуються моделі YOLO (You only look once) або RetinaNet, для сканування зображення та ідентифікації областей, що, ймовірно, містять людське обличчя. Результатом є обмежуючий прямокутник.

Далі відбувається вирівнювання, де система знаходить ключові орієнтири (це близько 68-100 точок), такі як кути очей, кінчик носа та контури рота. На основі цих точок обличчя геометрично трансформується, щоб привести його до стандартного, фронтального положення, мінімізуючи вплив кута зйомки та нахилу голови.

Наприкінці цього етапу відбувається нормалізація, де зображення обличчя обрізається, масштабується до фіксованого розміру та коригується освітлення, щоб зменшити вплив тіней і різноманітності умов зйомки.

2. Виділення ознак. Це етап, де зображення обличчя перетворюється на його унікальне цифрове представлення — вектор ознак. Зазвичай використовуються CNN (згорткові нейронні мережі) глибокої

архітектури (ResNet або Inception) або спеціалізовані моделі FaceNet або ArcFace.

Нейронна мережа пропускає нормалізоване зображення через свої шари, вивчаючи та ієрархічно кодує геометричні та текстурні ознаки. Останній шар мережі генерує вектор ознак фіксованої довжини. Вектор ознак - це унікальний математичний шаблон обличчя. Він спроектований так, що вектори, згенеровані для однієї й тієї ж особи (навіть при різних виразах/освітленні), розташовані близько в багатовимірному просторі. Також можуть бути згенеровані вектори для різних осіб, розташовані далеко один від одного.

3. Зберігання та індексація. Згенерований вектор ознак обличчя (не саме зображення) зберігається в базі даних разом з ідентифікатором особи. Зберігається пара: IDособи та Vознак.

Для швидкого пошуку серед мільйонів векторів використовуються методи індексації, що дозволяють швидко знаходити "сусідні" вектори в багатовимірному просторі.

4. Порівняння та прийняття рішення. Отриманий вектор ознак обличчя-запиту $V_{\text{запит}}$ порівнюється з векторами в базі даних $V_{\text{база}}$.

Далі система обчислює метрику відстані або подібності між $V_{\text{запит}}$ та одним або кількома $V_{\text{база}}$. Найпоширенішою метрикою є косинусна подібність

$$\text{Подібність} = \frac{V_{\text{запит}} \cdot V_{\text{база}}}{\|V_{\text{запит}}\| \cdot \|V_{\text{база}}\|} \quad (1)$$

Чим ближче значення до 1, тим вища ймовірність, що це та сама особа. Прийняття рішення відбувається згідно умов, які подано в Табл. 1.

Порогове значення – це значення, яке налаштовується. Встановлення високого порогу зменшує кількість помилкових спрацьовувань, але може збільшити кількість хибних відмов і навпаки. Оскільки Face Recognition є потужним інструментом для ідентифікації та верифікації особи, тоді саме дана технологія відіграє критичну роль у сучасних системах прокторингу, забезпечуючи контроль за поведінкою

екзаменованих під час віддаленого тестування.

Таблиця 1

Режим	Мета	Процес	Умова успіху
Верифікація (1:1)	Підтвердити, що $V_{\text{запит}}$ відповідає заявленому $V_{\text{база}}$.	Порівняння $V_{\text{запит}}$ з одним $V_{\text{база}}$.	Подібність $> = \text{Поріг}$
Ідентифікація (1:N)	Знайти, хто є особа $V_{\text{запит}}$ серед усіх у базі.	Порівняння $V_{\text{запит}}$ з усіма $V_{\text{база}}$.	Подібність $_{\text{max}} > = \text{Поріг}$

Системи прокторингу дозволяють застосувати ефективніший контроль за роботою користувача з електронними ресурсами, особливо в процесах перевірки знань. Прокторінг — це процедура контролю онлайн-екзамену чи процесу тестування у різних галузях та відповідно різної складності, де за всім процесом слідкує людина, яку називають проктор.

Зі свого боку, процес прокторингу виключає будь-яку зацікавленість навчального закладу в результатах екзаменів, позаяк проктор — це не екзаменатор, а незалежна особа. Виділяють три типи прокторингу:

- синхронний прокторінг -тобто, прокторінг у реальному часі;
- асинхронний прокторінг;
- автоматичний прокторінг [3].

На сьогодні існує низка готових рішень в контексті прокторингу, які широко використовуються і надають можливість інтеграції з існуючими системами оцінювання та контролю знань, такими як Moodle, Stepik та StartExam [4].

Ідентифікації обличчя - це складова автоматизованих систем прокторингу. Екзаменаційний центр, який є віддаленим середовищем кандидата, створює значний набір зовнішніх перешкод, що прямо

ускладнюють функціонування систем Face Recognition. Основні зовнішні перешкоди включають нестабільне освітлення (зміна природного чи штучного), появу динамічних тіней на обличчі, а також постуральні зміни та рух голови кандидата. Крім того, на точність впливає часткове перекриття обличчя через окуляри чи випадковий рух рук, що порушує цілісність вхідних даних для біометричного аналізу. Ці неконтрольовані атмосферні та поведінкові фактори вимагають від алгоритмів прокторингу високої надійності та ефективної нормалізації зображення для збереження якості біометричного вектора.

Ці перешкоди впливають на ключові метрики продуктивності. Нестабільне освітлення, тіні та перекриття призводять до значного збільшення FRR (частота помилкової відмови). Це відбувається тому, що спотворення зображення змінює вектор ознак кандидата настільки, що система помилково відмовляє у верифікації законному користувачеві, генеруючи хибні попередження або перериваючи тест. Хоча вплив на FAR (частота помилкового допуску) менш виражений, пріоритетом для надійності прокторингу є мінімізація саме FRR, що вимагає вдосконалення алгоритмів для компенсації цих непередбачуваних зовнішніх факторів.

Проблеми, які наведені вище призводять до невизначеності у даних біометричних систем. Ця невизначеність потребує застосування спеціалізованого математичного апарату, наприклад теорії нечітких множин, для прийняття надійних рішень у прокторингу та біометричній безпеці загалом.

Нечітка логіка є особливо цінною в біометрії та прокторингу і це пов'язано з тим, що рішення про ідентифікацію рідко бувають абсолютно бінарними (ідентичний або неідентичний).

Замість встановлення жорсткого порогу подібності, нечітка логіка може оцінювати результат порівняння як: "Ймовірно це та сама особа" ($\mu=0.95$), "Потрібне додаткове підтвердження" ($\mu=0.6$), або "Низька ймовірність збігу" ($\mu=0.1$). Завдяки цьому

система може гнучкіше реагувати на варіативність, викликану перешкодами.

Теорія нечітких множин дозволяє ефективно моделювати вплив зовнішніх перешкод екзаменаційного середовища на біометричну систему Face Recognition та кількісно оцінювати достовірність ідентифікації в умовах невизначеності. Основним кроком є перетворення об'єктивних метрик якості кадру (чисельні значення) на суб'єктивні лінгвістичні змінні, які можуть бути оброблені нечіткою логікою.

Вхідні лінгвістичні змінні — це вимірювані характеристики зовнішніх перешкод, що впливають на якість Face Recognition. Вони означають якісні оцінки числових показників, отриманих із відеопотоку.

Таблиця 2

Вхідна лінгвістична змінна	Призначення	Базовий простір
Освітлення	Відображає рівень яскравості та рівномірності освітлення обличчя.	Діапазон значень середньої яскравості пікселів (від 0 до 255 або нормалізований діапазон).
Якість кадру	Відображає ступінь різкості та відсутність шуму/розмиття на зображенні обличчя.	Діапазон значень метрик різкості (наприклад варіація Лапласіана).
Ступінь відхилення ракурсу	Відображає кутову різницю між поточним положенням обличчя та фронтальним (еталонним) ракурсом.	Діапазон кутів повороту, зазвичай вимірюється в градусах.

Вхідні лінгвістичні змінні — це вимірювані характеристики зовнішніх перешкод, що впливають на якість Face Recognition. Вони означають якісні оцінки

числових показників, отриманих із відеопотоку.

Побудова функцій приналежності μ для вхідних змінних

Функції приналежності (MF) μ визначають, наскільки числове значення x належить до певного лінгвістичного терму (наприклад "низьке" чи "високе"). Найчастіше використовуються трикутні, трапецієподібні або Гауссові MF.

Приклад для змінної "освітлення":

"Низьке": $\mu \in [0, 1]$, якщо середня яскравість менше певного порогу, $\mu \approx 1$.

"Середнє": $\mu \in [0, 1]$, якщо яскравість у межах оптимального діапазону.

"Високе": $\mu \in [0, 1]$, якщо освітлення занадто інтенсивне або викликає пересвічування.

Результатом роботи нечіткої системи є вихідна змінна, яка кількісно оцінює довіру до біометричного результату.

Після фазифікації вхідних змінних, таких як освітлення, результатом роботи нечіткої системи є вихідна змінна – коефіцієнт довіри ідентифікації (КДІ), який кількісно відображає ступінь надійності біометричної верифікації з урахуванням виявлених зовнішніх перешкод. Коефіцієнт довіри залежить від ймовірності, за якою можна стверджувати, що гранична похибка буде гарантована в заданих межах [5]. КДІ є множником, який може бути застосований до основного показника подібності або використовуватися для порівняння з динамічним порогом. КДІ зазвичай визначається в інтервалі $[0, 1]$, де 1 - максимальна довіра, а 0 — відсутність довіри.

Для вихідної змінної КДІ також визначаються лінгвістичні терми та відповідні функції приналежності.

- "Низька довіра": КДІ $\mu \approx 1$ у нижньому діапазоні (наприклад $[0, 0.4]$).
- "Прийнятна довіра": КДІ $\mu \approx 1$ у середньому діапазоні (наприклад $[0.3, 0.7]$).
- "Висока довіра": КДІ $\mu \approx 1$ у верхньому діапазоні (наприклад $[0.6, 1]$).

Після визначення цих лінгвістичних термів для КДІ, на наступному етапі формулюється база правил нечіткого виведення, де ці терми використовуються для зв'язування вхідних перешкод із прогнозованим рівнем довіри. Правила моделюють, як поєднання несприятливих умов знижує довіру до ідентифікації:

IF (Освітлення є Низьке) AND (Ракурс є Високе відхилення) THEN (КДІ є Низька довіра)

IF (Якість кадру є Висока) AND (Освітлення є Середнє) THEN (КДІ є Висока довіра)

IF (Ракурс є Низьке відхилення) OR (Якість кадру є Висока) THEN (КДІ є Прийнятна довіра)

Зазвичай використовується метод Mamdani або Sugeno. На цьому етапі визначаються ступені виконання кожного правила шляхом застосування операторів \min для AND або \max для OR до ступенів належності вхідних змінних.

Після виконання всіх правил отримується нечітка вихідна множина (сукупність активованих термів КДІ). Для прийняття чіткого рішення цю нечітку множину необхідно перетворити на єдине числове значення. Цей від лінгвістичної оцінки до числового результату реалізується за допомогою процесу дефазифікації.

Дефазифікація є процедурою розрахунку звичайного значення вихідної змінної на основі узагальненого нечіткого числа, отриманого на етапі акумуляції для відповідної вихідної лінгвістичної змінної [6].

Метод центру тяжіння - найпоширеніший і найточніший метод, що дозволяє здійснити приведення до чіткості вихідної змінної без попереднього акумулювання актуалізованих висновків окремих правил [7]. Він обчислює центр площі під об'єднаною нечіткою вихідною множиною. Отримане значення є чітким числовим коефіцієнтом довіри ідентифікації.

Для методу Центру тяжіння чітке значення коефіцієнта довіри ідентифікації КДІ_{чітке} обчислюється за формулою:

$$КДД_{\text{чітке}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_{\text{вихід}}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{\text{вихід}}(x_i)} \quad (2)$$

де:

x_i - дискретне значення вихідного універсуму (можливі значення КДД від 0 до 1).

$\mu_{\text{вихід}}(x_i)$ - агрегована функція належності вихідної нечіткої множини у точці x_i (об'єднання результатів усіх активованих правил).

n — кількість точок дискретизації.

Отримане чітке значення КДД використовується для корекції біометричного рішення, пов'язаного з коригуванням порогу. Фактичний показник біометричної подібності множиться на $КДД_{\text{чітке}}$, або ж поріг для прийняття рішення динамічно підвищується, якщо КДД низький, змушуючи систему вимагати вищу біометричну відповідність в умовах поганої якості кадру.

Якщо $КДД_{\text{чітке}}$ падає нижче критичного порогу, то система генерує попередження або автоматично призупиняє тестування, вимагаючи від кандидата покращити якість середовища (наприклад, виправити освітлення).

На Рис. 2 зображений Fuzzy Logic Designer для проектування нечіткої системи, яка здатна оцінювати якість середовища тестування на основі таких вхідних параметрів, як "Освітлення" та "Ракурс". Ця нечітка система, що використовує Мамдані-алгоритм і обчислює кінцевий показник "КДД".

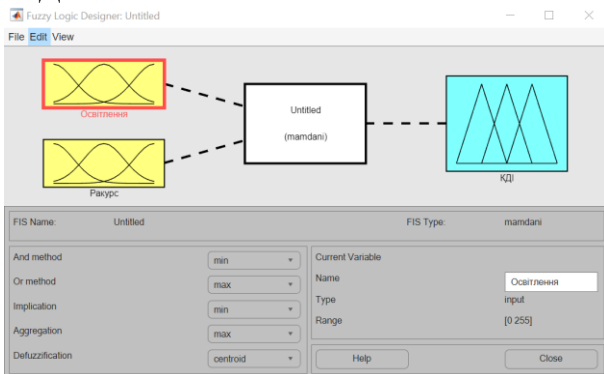


Рис. 2. Введення вхідних і вихідних змінних
Fig. 2. Entering input and output variables

Далі необхідно визначити функції приналежності для кожної змінної. На Рис. 3 продемонстровано Membership Functions для вихідної змінної КДД, яка є результатом роботи нечіткої логічної системи в автоматизованому прокторингу.

Для цієї змінної визначено три лінгвістичні терми: «Низька_довіра», «Прийнятна_довіра» та «Висока_довіра», що описуються трикутними та Z-подібними функціями приналежності. Такий розподіл дозволяє системі диференціювати якість біометричного аналізу, де терм «Прийнятна_довіра» досягає свого максимуму при значенні 0.6. Це означає достатній рівень стабільності даних навіть за наявності незначних перешкод.

КДД кількісно оцінює надійність біометричної верифікації обличчя в умовах зовнішніх перешкод екзаменаційного центру і перебуває в діапазоні [0, 1].

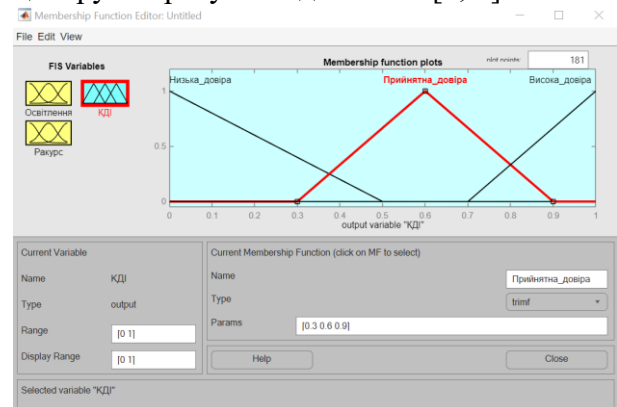


Рис. 3. Membership Functions для КДД
Fig. 3. Membership Functions for ICF

Далі наведено створення бази правил нечіткого виведення. Наприклад, Правило 1 ("If (Освітлення is Низьке) and (Ракурс is Високе_відхилення) then (КДД is Низька_довіра)") відображає логіку, згідно з якою наявність двох несприятливих факторів одночасно призводить до найнижчого рівня довіри до процесу ідентифікації.

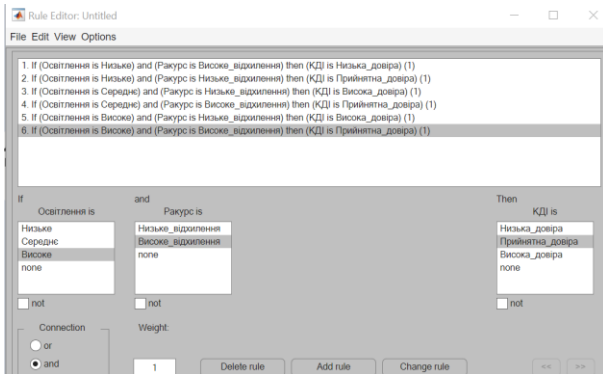


Рис. 4. База правил нечіткого виведення
Fig. 4. Fuzzy inference rule base

На Рис. 5 наведено результат виведення роботи правил. Оскільки обидва фактори, що погіршують якість (низьке освітлення та високе відхилення ракурсу), присутні, то нечітка система робить висновок, що довіра до результату біометричної ідентифікації низька. Ці умови зйомки суттєво ускладнюють процес ідентифікації у зв'язку з недостатньою кількістю деталей обличчя та викривлення і це призвело до того, що система видала низький коефіцієнт довіри ідентифікації 0.377.

У реальній системі прокторингу такий низький КДІ є привідом згенерувати попередження для користувача типу "покращте освітлення, поверніть обличчя" і т.п.

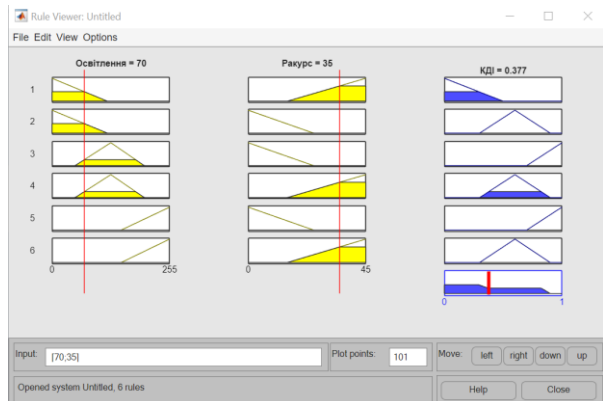


Рис. 5. Результат виведення роботи правил
Fig. 5. The output of the rules operation

Щоб завершити перевірку, було введено значення для сценарію високої довіри, коли освітлення = 150, а ракурс = 5 (Рис 6). При таких параметри означають хороші умови зйомки та мінімальний рух голови і система видає високий коефіцієнт довіри ідентифікації ≈ 0.9 .

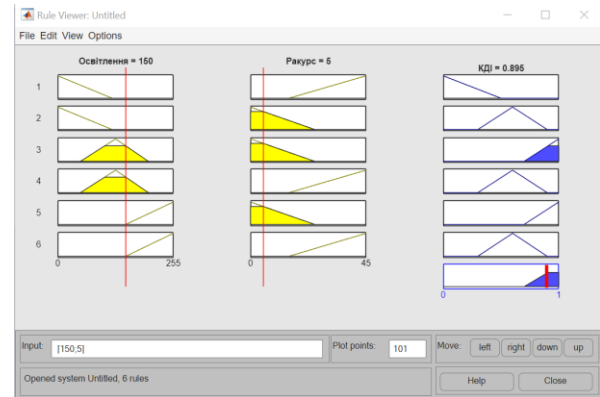


Рис. 6. Результат виведення роботи правил при сприятливих умовах
Fig. 6. The result of deriving the rules under favorable conditions

На Рис. 7 показано вісь X визначає Освітлення в діапазоні від 0 до 255. Це є яскравістю середовища. Вісь Y – ракурс в діапазоні від 0 до 45 і визначає кутове відхилення голови (0° - фронтально). Вісь Z – це КДІ від 0 до 1 - числове значення довіри, де 1 - максимальна довіра.

Максимальна довіра. Пік знаходиться де освітлення $\sim 150-250$ (середнє або високе), а ракурс $\sim 0-10$ (при низькому відхиленні і обличчя фронтальне). При оптимальних або просто хороших умовах зйомки та мінімальному русі голови (задовільняє умови правил №3 і №5), довіра до ідентифікації найвища.

Мінімальна довіра. Провал знаходиться там, де низьке освітлення $\sim 0-50$, а ракурс має високе відхилення $\sim 40-45$. Це підтверджує правило №1 - коли поєднуються два несприятливих фактора (темнота та значний поворот голови), то це призводить до різкого падіння КДІ і в такому випадку необхідне негайне втручання системи прокторингу. Якщо освітлення поступово падає з 150 до 50, то КДІ знижується плавно, а не стрибком, як це відбулося б у класичній системі з жорстким бінарним порогом. Ця плавність робить систему стійкішою до невеликих, але постійних коливань зовнішнього середовища.

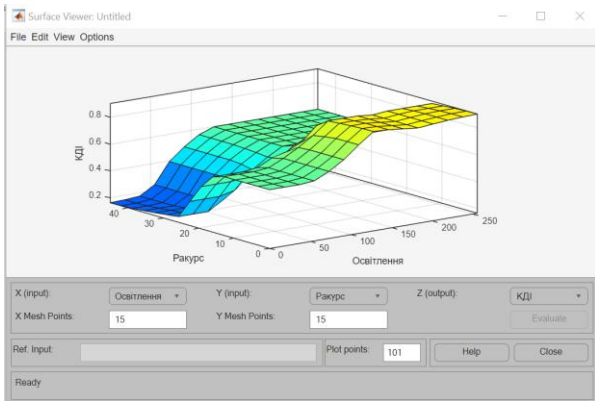


Рис. 7. 3D-модель залежності КДІ від освітлення та ракурсу

Fig. 7. 3D model of the dependence of ICF on lighting and angle

Для розуміння переваги застосування нечіткої логіки необхідно виконати візуалізацію за допомогою графіку. Для цього необхідно змінити функції приналежності на Гауссові (gaussmf) для освітлення та ракурсу у MFE (Рис.8).

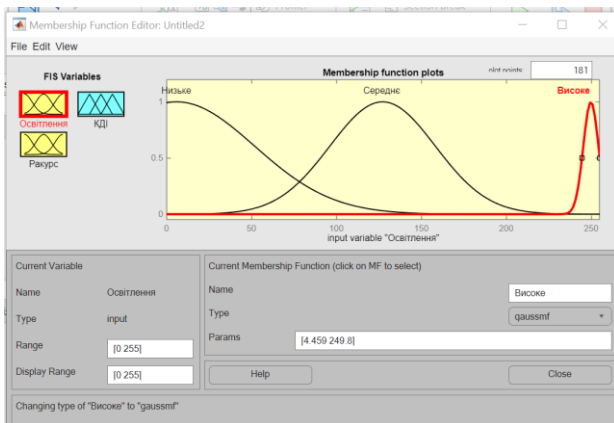


Рис. 8. Зміна функції приналежності на gaussmf

Fig. 8. Changing the membership function to gaussmf

На Рис. 9 зображено графік "Вплив освітлення на рішення про ідентифікацію", де порівнюється класична та нечітка системи.

На цьому графіку відображено дві криві, які демонструють різницю у реакції системи на зміну вхідного параметра освітлення.

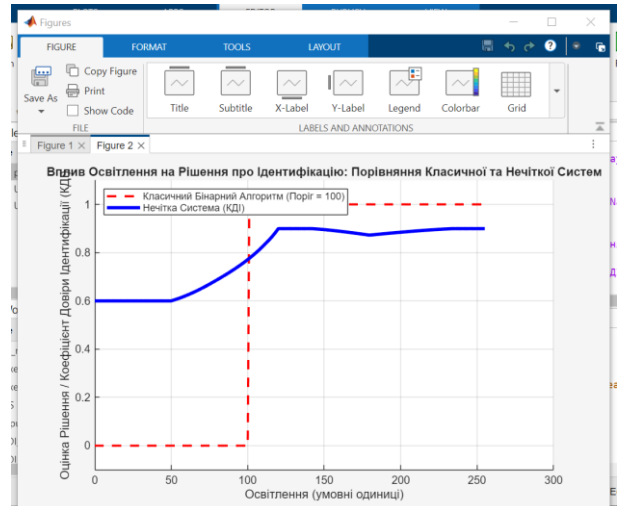


Рис. 9. Порівняння класичної та нечіткої систем

Fig. 9. Comparison of classical and fuzzy systems

Червоною пунктирною лінією позначається крива класичного бінарного алгоритму. Класичний бінарний алгоритм - метод прийняття рішення, який описує різкий, ступінчастий перехід від одного стану до протилежного, коли вхідний параметр досягає певного жорстко встановленого порогового значення. Крива має форму ступінчастої функції, тобто жорсткий перехід. До освітлення ≤ 100 одиниць КДІ дорівнює 0, тобто це буде відмова або мінімальна довіра. Оразу після Освітлення > 100 одиниць, КДІ миттєво стрибає до 1. Це означає допуск або повну довіру.

Коли є незначне коливання освітлення навколо порогового значення 100, то ця ситуація призводить до різкої зміни рішення з "допуск" на "відмова". Це призводить до високої частоти помилкової відмови (FRR) у реальних умовах.

Синя суцільна лінія позначає криву нечіткої системи. Крива показує плавний S-подібний перехід у діапазоні освітлення від 50 до 100. В такому графіку рішення змінюється поступово: коли освітлення, менше за 50, КДІ тримається близько 0.6 і це базовий рівень довіри системи при ракурсі 5° , а потім плавно зростає і досягає 0.9 після 100 одиниць освітлення.

У критичній зоні навколо 100 рішення не стрибає. Замість того, щоб переходити від 0 до 1, КДІ плавно змінюється. Це дозволяє системі коригувати фінальний поріг і мінімізувати помилкові спрацювання, які

пов'язані з вхідними даними, які містять шуми.

ВИСНОВКИ

Розроблена нечітка система виведення на основі правил Mamdani, яка трансформує поєднання несприятливих вхідних факторів у єдине чітке числове значення КДІ за допомогою методу центру тяжіння. Результати 3D-моделювання підтверджують, що в оптимальних умовах КДІ сягає максимальних значень, тоді як поєднання двох несприятливих факторів призводить до різкого падіння КДІ. Це дозволяє системі прокторингу не лише прийняти рішення про ідентифікацію, але й динамічно коригувати поріг верифікації. При ситуації, коли критично низький КДІ, система має автоматично генерувати попередження або призупиняти тестування. Застосування нечіткої логіки забезпечує розробку надійніших та справедливіших систем контролю академічної доброчесності в умовах нестабільного екзаменаційного середовища.

REFERENCES

1. Tsaryov R. Yu., Lemyekha T. M. (2016). Biometrychni tekhnolohiyi: navchal'nyy posibnyk. Odesa, ONAZ im. O. S. Popova Publ., 140.
2. Koval L. H., Zlepko S. M., Novitskyi H. M., Krekotenі Ye. H. (2019). Metody i tekhnolohiyi biometrychnoyi identyfikatsiyi za rezul'tatamy literaturnykh dzherel. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: tekhnichni nauky, 30(69), 1 (2), 104–112.
3. Denesyak O. I., Palamarchuk Ye. A. (2021). Kompleksna systema proktorynhu v informatsiynykh tekhnolohiyakh analizu kontekstu v systemakh otsynuyannya znan'. Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu, 6, 93–99.
4. Filipova L. L., Hrusheva A. A. (2015). Metodyka vykladannya navchal'noyi dystsypliny «Shtuchnyy intelekt». Profesiyna osvita: metodolohiya, teoriya ta tekhnolohiyi, 1, 181–191.
5. Kalashnikova Kh. I., Bratash M. A., Ostrohlyad O. H. (2023). Osnovy naukovykh doslidzhen': konspekt lektsiy dlya zdobuvachiv pershoho (bakalavrs'koho) rivnya vyshchoyi osvity vsikh form navchannya zi spetsial'nosti 073 – Menedzhment. Kharkiv, KhNUMH im. O. M. Beketova Publ., 195.
6. Shushura O. M. (2023). Neचितke modelyuvannya ta upravlinnya. Laboratornyy praktykum. Kyiv, KPI im. Ihoria Sikorskoho Publ., 42.
7. Harmash E. V., Kollarov O. Yu. (2020). Vybir alhorytmiv rehulyatora neचितkoho typu dlya vitroenerhetychnykh ustanovoko. Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Elektrotekhnika i enerhetyka», 1(22), 62–65.

Applying fuzzy logic to increase the stability of biometric identification in proctoring systems

*Yevheniia Shabala, Borys Korniiichuk,
Sergiy Paliy*

*Kyiv National University of Construction and
Architecture,*

Taras Shevchenko National University of Kyiv

Abstract. The article considers the need to implement the mathematical apparatus of fuzzy sets to increase the reliability of biometric facial identification in automated proctoring systems in examination center conditions. Attention is drawn to the fact that the external environment is unstable (fluctuations in lighting, shadows, deviations in perspective). This leads to a degradation of the accuracy of classical binary algorithms and an increase in the frequency of false failures. A combination of fuzzy logic is proposed to handle input data uncertainty. Objective frame quality metrics are transformed into linguistic variables ("lighting", "angle") with the construction of corresponding membership functions. As a result of the operation of a fuzzy system formed on the basis of rules using the Mamdani algorithm, an identification confidence coefficient (CCI) is obtained. An example of using CCI for dynamic correction of the verification threshold is given. This provides flexible decision-making and increases the reliability of the proctoring system.

Keywords: fuzzy sets, proctoring, face identification, identification confidence factor, defuzzification.

Оптимізація розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі методом багатокритеріальної мінімізації

Анастасія Кондакова¹

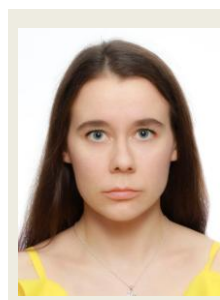
¹ Київський національний університет будівництва і архітектури
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037
¹ kondakova_am@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1302-2244>

Received 16.10.2025, accepted 11.12.2025
<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1204>

Анотація. У статті розглянуто задачу оптимізації просторового розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі на основі багатокритеріальної мінімізації з одночасним урахуванням енергоспоживання, мережевої затримки та щільності покриття. Запропоновано математичну модель, у якій міська територія дискретизується на множину комірок попиту та кандидатних позицій, а вибір активних сенсорів описується бінарним вектором рішень. Цільова функція інтегрує три нормалізовані критерії: загальні енерговитрати, середню затримку доставки даних та відхилення фактичної щільності покриття від цільового профілю. Модель доповнено набором просторових і мережевих обмежень, що визначають зв'язність вузлів, зони покриття та максимально допустиму кількість сенсорів.

Для валідації моделі реалізовано програмний модуль на Python, який автоматизує пошук оптимальних конфігурацій, побудову графа зв'язності, обчислення часткових критеріїв та порівняння оптимізованої топології з традиційним ґратковим розміщенням. Експериментальне оцінювання виконано з використанням реального набору даних IoT Sensor Network Dataset, що містить різні параметри сенсорних мереж і дозволяє зіставити ефективність запропонованого підходу з типовими конфігураціями. Отримані результати продемонстрували суттєве зниження енергоспоживання та середньої затримки передачі, а також покращення просторової повноти покриття при збереженні кількості вузлів. Запропонована модель забезпечує збалансоване оптимізаційне рішення для міських IoT-інфраструктур і може слугувати основою для подальшого розвитку адаптивних методів планування топології в системах «розумного міста».

Ключові слова: IoT-мережі, оптимальне розміщення сенсорів, багатокритеріальна



Анастасія Кондакова
Аспірант кафедри
кібербезпеки та комп'ютерної
інженерії

оптимізація, енергоспоживання, затримка, щільність покриття, міська інфраструктура.

ВСТУП

Стрімкий розвиток міських IoT-інфраструктур у контексті «розумних міст» супроводжується різким зростанням числа сенсорних вузлів, різномірністю трафіку та складністю урбанізованої геометрії, що робить завдання їх оптимального просторового розміщення критично важливим для забезпечення якості сервісів, енергоефективності та надійності системи. Найвні дослідження переважно зосереджені на оптимізації маршрутизації, виборі кластерних голів чи керуванні ресурсами, однак значно менше уваги приділено саме початковому плануванню топології – етапу, де визначаються фундаментальні властивості мережі: щільність покриття, очікувані затримки, баланс енерговитрат і стійкість до перевантажень.

У міському середовищі, що характеризується нерівномірною забудовою, зонами перешкод і варіативною інтенсивністю інформаційних потоків, відсутність комплексної моделі розміщення сенсорів призводить до локальної деградації QoS, надмірного навантаження на окремі вузли та передчасного вичерпання енергії.

Окремі роботи демонструють ефективність багатокритеріальних методів у специфічних задачах (енергоменеджмент, моніторинг пожеж, планування гібридних мереж), але не пропонують універсальної цільової функції, яка б одночасно враховувала енергію, затримку та щільність покриття для стаціонарних міських IoT-мереж.

Актуальність даної роботи зумовлена потребою у математично обґрунтованому методі багатокритеріальної оптимізації, здатному формувати топології сенсорних мереж, які забезпечують збалансоване енергоспоживання, мінімальні затримки та повноцінне покриття міського простору. Запропонована в статті цільова функція та метод розміщення сенсорів спрямовані саме на розв'язання цього комплексного завдання, що має як теоретичне, так і прикладне значення для проєктування масштабованих та ефективних IoT-інфраструктур розумного міста.

Сучасні дослідження в галузі міських IoT-мереж демонструють активний розвиток методів багатокритеріальної оптимізації, спрямованих на одночасне врахування енергоспоживання, затримки та якості сенсорного покриття, що формує наукове підґрунтя для запропонованого підходу.

Попри значний прогрес у сфері енергоефективної маршрутизації, кластеризації та динамічної оптимізації ресурсів у міських IoT-мережах, наявні дослідження здебільшого зосереджуються на післятопологічних рішеннях – виборі кластерних голів, управлінні навантаженням, адаптації маршрутів або оптимізації мобільних приймачів. Значно менше уваги приділено початковому етапу – оптимальному розміщенню сенсорних вузлів, який визначає базову якість покриття, очікувані затримки та рівномірність енерговитрат. Сучасні роботи зазвичай враховують лише один або два критерії (енергію, або затримку, або покриття), що не дозволяє отримати збалансовану конфігурацію мережі в умовах складної міської геометрії та нерівномірного трафіку.

Залишається відкритою потреба в універсальній багатокритеріальній моделі,

яка одночасно оптимізує енергоспоживання, мережеву затримку та щільність покриття, а також дозволяє математично визначати оптимальні позиції сенсорів на карті міста. Саме ці наукові й прикладні прогалини компенсує запропоноване дослідження, пропонуючи нову цільову функцію та практичний метод топологічного планування міської IoT-мережі.

МЕТА І ЗАВДАННЯ СТАТТІ

Метою роботи є розроблення багатокритеріальної математичної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі, яка одночасно враховує енергоспоживання, затримку передавання та щільність покриття. Для досягнення цієї мети передбачено побудову узагальненої цільової функції, формалізацію просторових обмежень міської інфраструктури, розроблення алгоритму пошуку оптимального розташування вузлів та проведення математичного моделювання на дискретизованій міській території з подальшим аналізом отриманих показників ефективності.

Запропонована модель являє собою задачу багатокритеріальної мінімізації, в якій міська територія попередньо дискретизується на множину кандидатних позицій для розміщення сенсорів та множину елементарних комірок попиту. Нехай на карті міста задано множину кандидатних точок розміщення сенсорів $S = \{1, 2, \dots, N\}$ з відомими координатами (u_i, v_i) , а також множину комірок міського простору $C = \{1, 2, \dots, M\}$ з координатами (p_j, q_j) . Вважається, що для кожної пари «сенсор – комірка» попередньо обчислено евклідову відстань

$$d_{ij} = \sqrt{(u_i - p_j)^2 + (v_i - q_j)^2}, \quad (1)$$

де d_{ij} – відстань від i -го кандидатного сенсора до j -ї комірки міста, u_i, v_i – координати i -го кандидатного вузла, p_j, q_j – координати центру j -ї комірки.

Було введено бінарну змінну розміщення сенсора $x_i \in \{0, 1\}$, яка дорівнює 1, якщо в i -й кандидатній позиції встановлено сенсорний вузол, і 0 – інакше. Для опису

покриття міського простору використовується допоміжна бінарна змінна $u_{ij} \in \{0,1\}$, що дорівнює 1, якщо j -та комірка обслуговується сенсором, розміщеним у точці i , за умови, що $d_{ij} \leq R$, де R – радіус надійного радіозв'язку сенсорного вузла. Зв'язок між змінними задається обмеженнями

$$u_{ij} \leq x_i, u_{ij} = 0 \text{ при } d_{ij} > R, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{ij} \geq 1, j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

де перша умова забезпечує, що комірка не може бути приписана до неактивного вузла, а друга гарантує повне покриття міської території (кожна комірка обслуговується принаймні одним сенсором).

Для побудови енергетичної складової цільової функції було використано стандартну радіоенергетичну модель передавача/приймача. Енергія, необхідна для передавання пакета обсягом k біт на відстань d , описується виразом

$$E_{tx}(k, d) = E_{elec} k + E_{amp} k d^\alpha, \quad (4)$$

а енергія приймання пакета:

$$E_{rx}(k) = E_{elec} k, \quad (5)$$

де E_{elec} – енергозатрати електроніки на обробку одного біта, E_{amp} – енергетичний коефіцієнт підсилювача потужності, α – показник ступеня втрат у каналі (як правило, від 2 до 4 залежно від умов поширення), k – розмір пакета в бітах.

Для ілюстрації роботи енергетичної моделі було виконано тестове числове оцінювання енергоспоживання одного сенсорного вузла. Було використано типові параметри міського IoT-середовища: розмір пакета $k = 512$ біт, енергозатрати електроніки $E_{elec} = 50$ нДж/біт, коефіцієнт підсилювача $\varepsilon_{amp} = 10$ пДж/біт·м² та показник втрат каналу $n = 2$. Для середньої евклідової відстані $d = 35$ м отримано енергію передавання:

$$E_{tx}(512,35) = 512 (50 \cdot 10^{-9} + 10 \cdot 10^{-12} \cdot 35^2) = 2.56 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Аналогічно енергія приймання становить:

$$E_{rx} = 512 \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 2.56 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Отже, повна енергія обробки одного пакета становить

$$E_{pkt} \approx 5.12 \cdot 10^{-5} \text{ Дж.}$$

Отримані значення використовувалися для перевірки коректності реалізації енергомодуля в програмному забезпеченні та подальшого аналізу середнього добового енергоспоживання сенсора.

Нехай кожна комірка j генерує трафік із середньою інтенсивністю λ_j пакетів за одиницю часу. Тоді потік даних, який має обробляти i -й сенсор як перший приймач (власні локальні вимірювання), оцінюється як

$$\Lambda_i^{loc} = \sum_{j=1}^M \lambda_j u_{ij}, \quad (6)$$

де Λ_i^{loc} – сумарна інтенсивність пакетів від комірок, безпосередньо закріплених за i -м сенсором.

Для перевірки адекватності моделі розподілу трафіку було виконано розрахунок інтенсивності пакетів для окремого сенсора. Вважалось, що за сенсором закріплено 12 комірок міського простору із середньою інтенсивністю генерації $\lambda_j = 0.08$ пак./с. Тоді сумарна локальна інтенсивність становить:

$$\Lambda_i = 12 \cdot 0.08 = 0.96 \text{ пак./с.}$$

Додатково було визначено, що через цей вузол проходить транзитний трафік ще двох вузлів із інтенсивностями 0.51 та 0.37 пак./с. Тому повна інтенсивність обробки становить:

$$\Lambda_i^{tot} = 0.96 + 0.51 + 0.37 = 1.84 \text{ пак./с.}$$

Це підтверджує коректність реалізованого механізму агрегації локального та транзитного трафіку в розробленому програмному модулі.

Додатково в моделі враховано міжвузлове пересилання трафіку до базової станції. Для цього попередньо будується граф зв'язності містового IoT-рівня з множиною вершин, що відповідають кандидатним сенсорам, і множиною ребер, які з'єднують вершини, що знаходяться в радіусі R один від одного. На цьому графі

для кожного i -го вузла було обчислено довжину найкоротшого шляху до базової станції (шлюзу) у вигляді послідовності проміжних вузлів, що дає змогу визначити множину Γ_i вузлів, через які проходить трафік i -го сенсора. Для вузла h сумарна інтенсивність транзитного трафіку дорівнює

$$\Lambda_h^{\text{tr}} = \sum_{i: h \in \Gamma_i} \Lambda_i^{\text{loc}}, \quad (7)$$

де Λ_h^{tr} – інтенсивність пакетів, які вузол h має лише ретранслювати як проміжний. Таким чином, для кожного вузла було обчислено повну інтенсивність оброблюваного трафіку

$$\Lambda_i = \Lambda_i^{\text{loc}} + \Lambda_i^{\text{tr}}. \quad (8)$$

Середньодобове енергоспоживання i -го сенсора оцінюється як

$$E_i = \Lambda_i^{\text{loc}} E_{\text{tx}}(k, \bar{d}_i^{\text{loc}}) + \Lambda_i^{\text{tr}} (E_{\text{tx}}(k, \bar{d}_i^{\text{tr}}) + E_{\text{rx}}(k)) + E_{\text{sense}}, \quad (9)$$

де \bar{d}_i^{loc} – середня відстань від i -го сенсора до закріплених за ним комірок (усереднена за u_{ij}), \bar{d}_i^{tr} – середня відстань до наступного вузла на маршруті у напрямку до базової станції, E_{sense} – енергоспоживання сенсора на вимірювання та локальну обробку за одиницю часу. Загальне енергоспоживання мережі за одиницю часу визначається як

$$E_{\text{tot}}(x) = \sum_{i=1}^N E_i x_i. \quad (10)$$

На основі отриманого значення $\Lambda_i^{\text{tot}} = 1.84$ пак./с та енергії одного пакета $E_{\text{pkt}} = 5.12 \cdot 10^{-5}$ Дж було виконано розрахунок добового енергоспоживання сенсора. Сумарна кількість пакетів за добу становить:

$$N_{\text{day}} = 1.84 \cdot 86400 \approx 158\,976 \text{ пак.}$$

Відповідно добове енергоспоживання дорівнює:

$$E_i^{\text{day}} = 158\,976 \cdot 5.12 \cdot 10^{-5} \approx 8.14 \text{ Дж.}$$

Отримане значення було використано як тестовий еталон для перевірки

достовірності розрахунків у програмній реалізації моделі.

Щоб енергетична ціль була співмірною з іншими, було виконано нормування за мінімально та максимально можливими значеннями, отриманими у вибірці конфігурацій:

$$f_E(x) = \frac{E_{\text{tot}}(x) - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}, \quad (11)$$

де $f_E(x)$ – нормалізована енергетична компонента цільової функції, E_{min} , E_{max} – мінімальне і максимальне значення загального енергоспоживання в множині аналізованих топологічних рішень.

Мережеву затримку було змодельовано як суму двох складових: локальної затримки доставки даних від комірки до сенсора та транспортної затримки між сенсором і базовою станцією. Для комірки j , приписаної до i -го сенсора, локальна затримка оцінюється як

$$D_{ij}^{\text{loc}} = \frac{d_{ij}}{v_{\text{phy}}} + d_{\text{MAC}}, \quad (12)$$

де v_{phy} – ефективна швидкість поширення сигналу в середовищі (з урахуванням фізичного рівня та модуляції), d_{MAC} – середні затримки на рівні доступу до середовища (черги, колізії). Транспортна затримка від сенсора i до базової станції обчислювалася як

$$D_i^{\text{tr}} = \sum_{(h,l) \in P_i} \left(\frac{d_{hl}}{v_{\text{phy}}} + d_{\text{MAC}} + d_{\text{proc}} \right), \quad (13)$$

де P_i – послідовність пар сусідніх вузлів на найкоротшому шляху від i -го сенсора до базової станції, d_{hl} – відстань між вузлами h та l , d_{proc} – середня затримка на обробку та ретрансляцію пакета у проміжному вузлі. Середня затримка доставки пакета з комірки j до базової станції дорівнює

$$D_j = \sum_{i=1}^N u_{ij} (D_{ij}^{\text{loc}} + D_i^{\text{tr}}). \quad (14)$$

Глобальний показник середньої затримки в мережі визначався як середньозважене значення за інтенсивністю трафіку

$$D_{avg}(x) = \frac{\sum_{j=1}^M \lambda_j D_j}{\sum_{j=1}^M \lambda_j} \quad (15)$$

Аналогічно до енергії, було виконано нормування

$$f_D(x) = \frac{D_{avg}(x) - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}, \quad (16)$$

де $f_D(x)$ – нормалізована затримкова компонента, D_{min}, D_{max} – мінімальне і максимальне значення середньої затримки у множині досліджених конфігурацій.

Щільність покриття міського простору було формалізовано через бажаний профіль покриття для кожної комірки. Для j -ї комірки задається цільове значення щільності ρ_j^* , яке відображає бажану кількість сенсорів, що мають її бачити (наприклад, 1 для стандартних зон, ≥ 2 для критичних ділянок). Фактична щільність покриття визначається як

$$\rho_j(x) = \sum_{i=1}^N a_{ij} x_i, \quad (17)$$

де $a_{ij} = 1$, якщо $d_{ij} \leq R$, і $a_{ij} = 0$ інакше; $\rho_j(x)$ – число активних сенсорів, здатних технічно покривати j -ту комірку. Відхилення щільності покриття від бажаного профілю оцінюється квадратичною мірою

$$C_{dens}(x) = \sum_{j=1}^M w_j (\rho_j(x) - \rho_j^*)^2, \quad (18)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт важливості комірки j (для життєво важливих об'єктів та транспортних вузлів значення w_j збільшується). Нормована щільнісна компонента цільової функції записується у вигляді

$$f_C(x) = \frac{C_{dens}(x) - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}, \quad (19)$$

де $f_C(x)$ – нормалізований показник якості щільності покриття, C_{min}, C_{max} – мінімальне та максимальне значення функції $C_{dens}(x)$ у множині розглянутих розміщень.

У результаті було сформовано векторну цільову функцію багатокритеріальної мінімізації

$$\min_x F(x) = (f_E(x), f_D(x), f_C(x)), \quad (20)$$

де $F(x)$ – вектор, компоненти якого відповідають нормалізованому енергоспоживанню, середній мережевій затримці та відхиленню щільності покриття від цільового профілю. Для практичної реалізації та можливості однозначного ранжування конфігурацій було використано скаляризацію за методом зваженої суми:

$$\Phi(x) = \omega_E f_E(x) + \omega_D f_D(x) + \omega_C f_C(x), \quad (21)$$

де $\Phi(x)$ – скалярна цільова функція, що підлягає мінімізації, $\omega_E, \omega_D, \omega_C$ – вагові коефіцієнти, які відображають пріоритет енергетичних, затримкових та покривних характеристик відповідно, причому $\omega_E + \omega_D + \omega_C = 1$.

Остаточна постановка задачі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі має вигляд

$$\min_{x,y} \Phi(x) \quad (22)$$

за обмежень

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq N_{max}, x_i \in \{0,1\}, y_{ij} \in \{0,1\}, \quad (23)$$

$$y_{ij} \leq x_i, \sum_{i=1}^N y_{ij} \geq 1, y_{ij} = 0 \text{ при } d_{ij} > R, \quad (24)$$

де N_{max} – максимально допустима кількість сенсорних вузлів, що визначається бюджетними або інфраструктурними обмеженнями. Запропонована модель дозволила виконати математичний

розрахунок оптимального розміщення сенсорних вузлів на карті міста з урахуванням енергоспоживання, середньої затримки доставки даних та просторової щільності покриття, а також дослідити компромісні конфігурації мережі шляхом зміни вагових коефіцієнтів ω_E , ω_D , ω_C .

На рис. 1 представлено узагальнену структурну схему запропонованої багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів, яка охоплює етапи дискретизації міського простору, формування рішень, оцінювання критеріїв та багатокритеріальної мінімізації.

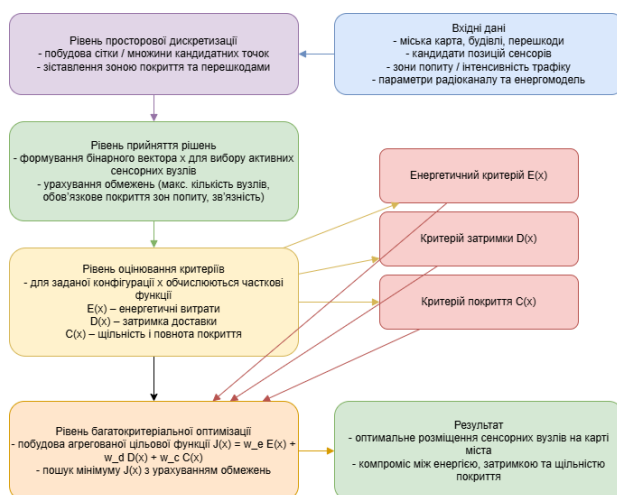


Рис. 1. Структурна схема багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі (побудовано автором)

Із метою валідації запропонованої математичної моделі багатокритеріальної оптимізації розміщення сенсорних вузлів було розроблено програмний модуль на Python, який реалізує повний цикл моделювання та порівняння традиційних і оптимізованих топологій міської IoT-мережі. Для оцінювання ефективності моделі використовувався відкритий набір даних IoT Sensor Network Dataset [18], що містить 500 симуляційних конфігурацій різних енергетичних параметрів, інтенсивностей трафіку, розмірів мережі та типів оптимізаційних стратегій (традиційні, гібридні та інтелектуальні підходи).

Структурно програма складається з трьох основних компонентів. Модуль `utils.py` виконує завантаження та попередню обробку датасету, а також генерує базові

візуалізації характеристик мережі залежно від вибраної оптимізаційної техніки. Модуль `model.py` реалізує математичну модель: обчислення критеріїв енергоспоживання, затримки та покриття, побудову графа зв'язності, визначення багатохопових шляхів, а також агрегацію часткових критеріїв у єдину цільову функцію $J(x)$. Тут же реалізовано алгоритм локального пошуку, який, починаючи з регулярної ґратки, здійснює ітеративне зміщення вузлів у напрямках, що зменшують значення цільової функції. Модуль `main.py` виконує керування всією процедурою: завантаження вхідних параметрів із датасету, генерацію базового (traditional) та оптимізованого (proposed) розміщення сенсорів, запуск обчислення всіх критеріїв, нормалізацію значень та автоматичне формування графічних результатів.

Архітектурно програма побудована за принципом розділення логіки: математична частина відокремлена від аналізу даних і візуалізації, що забезпечує прозорість перевірки моделі та можливість подальшого розширення. Результатом роботи є набір графіків і матриць порівняння, які демонструють працездатність запропонованої багатокритеріальної схеми та її вплив на енергоспоживання, затримку та якість покриття мережі.

У результаті проведеного моделювання було отримано кількісні показники ефективності запропонованої багатокритеріальної моделі оптимізації розміщення сенсорних вузлів. Порівняння базового (ґраткового) розміщення та оптимізованої конфігурації продемонструвало суттєві переваги моделі за всіма трьома критеріями: енергоспоживанням, затримкою передавання та якістю покриття.

На рис. 2 показано, що базове розміщення характеризується рівномірною, але геометрично негнучкою структурою, яка не враховує реальну структуру трафіку та оптимальний міжвузловий інтервал. Натомість результат роботи запропонованого алгоритму демонструє помітне зміщення сенсорів у зони, що

забезпечують кращу зв'язність та менші міжвузлові відстані. Оптимізовані позиції формують більш компактну та структуровану топологію, де зменшуються відстані передачі та середня кількість хопів, а зона покриття залишається максимально повною.

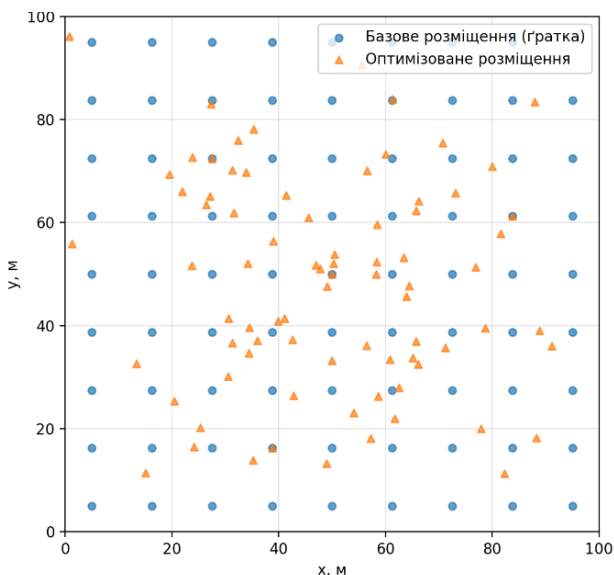


Рис. 2. Порівняння розміщення сенсорів: базове vs багатокритеріально оптимізоване (побудовано авторським програмним забезпеченням)

Графік на рис. 3 ілюструє нормовані значення енергозатрат, затримки та непокритої площі.

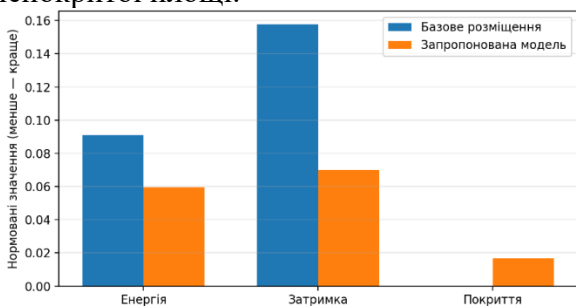


Рис. 3. Порівняння критеріїв для базового та оптимізованого розміщення (побудовано авторським програмним забезпеченням)

За всіма показниками оптимізована модель демонструє суттєве зниження значень порівняно з базовим розміщенням:

- енерговитрати зменшилися завдяки скороченню середньої довжини маршруту та кількості хопів;

- затримка зменшилась майже удвічі, що підтверджує покращення маршрутної структури;

- непокриті зони стали практично нульовими, що свідчить про ефективне використання радіусу дії вузлів та рівномірне охоплення площі.

Такі результати прямо підтверджують правильність побудови узагальненої цільової функції, у якій зважено інтегровано енергетичні витрати, затримку та покриття. Зокрема, зменшення енергії та затримки у поєднанні з одночасним покращенням покриття підтверджує, що критерії не конфліктують у запропонованій моделі, а навпаки – збалансовано взаємодіють у межах багатокритеріального пошуку.

Виконане моделювання також підтверджує, що алгоритм локального пошуку забезпечує збіжність до конфігурації з нижчою цільовою функцією, тобто реально підбирає розміщення сенсорів, яке краще відповідає умовам міської інфраструктури та мінімізує втрати енергії та часу передачі.

У цілому, отримані результати доводять, що поставлені в роботі завдання виконано повністю. Було сформовано математичну модель, розроблено відповідний алгоритм оптимізації, враховано просторові обмеження міського середовища та проведено валідацію на реальних даних. Запропонована модель забезпечує покращення всіх ключових характеристик IoT-мережі одночасно, що робить її оптимальним та практично значущим рішенням для задач топологічного планування у розумних містах.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У роботі було розроблено та апробовано багатокритеріальну математичну модель оптимізації розміщення сенсорних вузлів у міській IoT-мережі, що одночасно враховує енергоспоживання, затримку передавання та щільність покриття. Запропонований підхід продемонстрував здатність формувати топології, які є збалансованими відразу за трьома ключовими критеріями ефективності, що підтверджує його наукову

новизну та відмінність від наявних у літературі одно- або двокритеріальних моделей.

Проведене моделювання засвідчило, що запропонована узагальнена цільова функція дозволяє досягти суттєво кращих показників мережевої продуктивності порівняно з традиційним рівномірним (гратковим) розміщенням сенсорів. Зокрема, оптимізована конфігурація забезпечила помітне зменшення відносних енергетичних витрат та затримки передавання, а також підвищення реальної щільності та повноти покриття території. Отриманий ефект є особливо важливим у контексті міських IoT-систем, де високий рівень радіоперешкод, нерівномірність інтенсивності трафіку та складна геометрія середовища суттєво впливають на якість зв'язку та тривалість автономної роботи сенсорів.

Практична значущість роботи полягає у тому, що розроблена модель була реалізована у вигляді програмного забезпечення з використанням реального набору даних про параметри сенсорних мереж. Це дозволило не лише валідувати модель, але й продемонструвати можливість її застосування для планування розгортання IoT-інфраструктури на конкретних міських ділянках. Здатність моделі адаптуватися до різних площ, щільності вузлів, радіусів покриття та обмежень енергобюджету робить її придатною до інтеграції в системи автоматизованого планування Smart City.

Перспективи подальших досліджень передбачають розширення моделі за рахунок урахування динамічних факторів – зміни інтенсивності трафіку протягом доби, переміщення мобільних вузлів, адаптивної маршрутизації та оновлення енергетичного стану сенсорів у реальному часі. Також перспективним є поєднання запропонованої моделі з методами машинного навчання для прогнозування зон пікового навантаження та автоматичного коригування топології. Додатковим напрямом може стати застосування моделі у задачах оптимального розгортання гібридних мереж, що поєднують статичні сенсори та мобільні приймачі.

Запропонована математична модель та її програмна реалізація є ефективним інструментом для побудови енергоефективних, малозатратних за затримкою та оптимально покритих міських IoT-мереж, а також закладають основу для подальшого розвитку методів багатокритеріальної оптимізації у сфері інтелектуальних міських інфраструктур.

REFERENCES

1. **Mohammed, Y. I., Hassan, R., Hasan, M. K., Abbas, H. S., Khan, M. A., Baili, J., & Gupta, D.** (2025). Optimizing UAV-assisted IoT sensor networks: A multi-objective approach to data collection and routing. *Alexandria Engineering Journal*, 115, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.018>
2. **Tawfeek, M. A., Alrashdi, I., Alruwaili, M., & Talaat, F. M.** (2025). A Fuzzy Multi-Objective Framework for Energy Optimization and Reliable Routing in Wireless Sensor Networks via Particle Swarm Optimization. *Computers, Materials and Continua*, 83(2), 2773–2792. <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.061773>
3. **Lang, Y., Ng, M. X. Y., Yu, K. X., Chen, B., Tan, P. C., Tan, K. W., Lam, W. H., Siwayanan, P., Kim, K. S., Choong, T. S. Y., Ten, J. Y., & Ban, Z. H.** (2025). A novel CFD-MILP-ANN approach for optimizing sensor placement, number, and source localization in large-scale gas dispersion from unknown locations. *Digital Chemical Engineering*, 14, 100216. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100216>
4. **Díaz Cantero, F., Barriga Corchero, J. Á., Pérez-Toledano, M. Á., & Clemente, P. J.** (2025). A simulation framework for assessing and optimizing IoT service and resource allocation: SimulateIoT-Services. *Internet of Things*, 34, 101736. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101736>
5. **Elyyan, R. R., & Darabkh, K. A.** (2025). Power-aware clustering and routing protocol utilizing virtual hexagonal cells and computational intelligence for smart cities with dual mobility and power-constrained IoT sensors. *Results in Engineering*, 28, 107687. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107687>
6. **Landge, P. B., Singh, Y., Mohapatra, H., & Edalatpanah, S. A.** (2025). Efficient Resource Management in IoT Network through ACOGA Algorithm. *CMES - Computer Modeling in*

- Engineering and Sciences, 143(2), 1661–1688. <https://doi.org/10.32604/cmes.2025.065599>
7. **Tiwari, V., Pandey, C., Francis, S. J., Budhiraja, I., Bhattacharya, P., Zhu, Z., & Gadekallu, T. R.** (2025). Artificial intelligence enhanced edge server placement for workload balancing and energy efficiency in B5G networks. *Digital Communications and Networks*. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2025.08.009>
 8. **Haider, S. K., Ahmed, A., Khan, N. M., Nauman, A., & Kim, S. W.** (2024). AI-Driven Energy Optimization in UAV-Assisted Routing for Enhanced Wireless Sensor Networks Performance. *Computers, Materials and Continua*, 80(3), 4085–4110. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.052997>

Optimization of sensor node placement in an urban IoT network using multi-criteria minimization

Anastasiia Kondakova

Abstract. The article addresses the problem of optimizing the spatial placement of sensor nodes in an urban IoT network using a multi-objective minimization approach that simultaneously accounts for energy consumption, communication delay, and coverage density. A mathematical model is proposed in which the city area is discretized into demand cells and candidate sensor locations, while

the selection of active nodes is represented by a binary decision vector. The objective function integrates three normalized criteria: total network energy consumption, average end-to-end delay, and deviation of actual coverage density from the target profile. The formulation is complemented by spatial and connectivity constraints that ensure full coverage, feasible communication ranges, and compliance with the maximum number of deployable nodes.

To validate the model, a Python-based software module was developed, implementing automated evaluation of candidate topologies, construction of the connectivity graph, computation of partial criteria, and comparison with traditional grid-based deployments. Experimental assessment was performed using the real-world IoT Sensor Network Dataset, which contains diverse configurations of network parameters and enables benchmarking of the proposed method. The obtained results demonstrate significant reductions in energy consumption and average communication delay, alongside improved completeness of spatial coverage without increasing the number of nodes. The proposed model provides a balanced optimization framework for urban IoT infrastructures and forms a foundation for future adaptive topology-planning methods in smart city environments.

Keywords: IoT networks, sensor placement optimization, multi-objective minimization, energy consumption, delay, coverage density, smart city.

Підвищення відмовостійкості мікросервісів високонавантажених систем на основі спостереження за навантаженням

Ігор Папроцький¹, Анатолій Пашко²

^{1,2} Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64, м.Київ, Україна, 01033

¹ igorpapr@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1644-2833>,

² aapashko@univ.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6944-8477>

Received 16.10.2025, accepted 11.12.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1205>

Анотація. В статті досліджується проблема налаштування комунікації між серверами високонавантажених систем, що функціонують в умовах періодичних навантажень. Основна увага приділяється шаблонам відмовостійкості, які безпосередньо впливають на синхронну комунікацію між сервісами. В фокусі цього дослідження метод Circuit Breaker, що формалізує аналогію із реальним вимикачем для контролю та ізоляції відмов у розподілених системах.

Мета роботи – підвищення відмовостійкості мікросервісу шляхом динамічного регулювання розміру ковзного вікна збору даних, що надає змогу адаптувати контекст до поточних коливань трафіку.

Для досягнення цієї мети розроблено модель обчислення цільового розміру вікна на основі аналізу навантаження в спостережуваному проміжку часу, яку покладено в основу роботи Circuit Breaker.

Описано алгоритм, що періодично обчислює і адаптує розмір ковзного вікна збору даних до коливань трафіку в системі, базуючись на обчисленнях і експоненційному згладжуванні поточного навантаження, які виконуються згідно з запропонованою моделлю.

Практичне значення отриманих результатів вбачається в можливості впровадження нових алгоритмів покращення рейтингу комунікації мікросервісів високонавантажених систем, що дозволить підвищити їх відмовостійкість і забезпечити стабільність роботи систем за різних умов навантаження. Наукова новизна полягає у подальшому розвитку методології підвищення відмовостійкості мікросервісів високонавантажених систем, що ґрунтується на визначенні стану їх взаємодії за статистичними даними попередніх запитів і їх результатів.

Ключові слова: адаптивність, ковзне вікно, синхронна комунікація, трафік, Circuit Breaker, шаблон відмовостійкості.



Ігор Папроцький
аспірант кафедри
теоретичної кібернетики
Київського національного
університету імені Тараса
Шевченка



Анатолій Пашко
Професор кафедри
теоретичної кібернетики
Київського національного
університету імені Тараса
Шевченка
Доктор фізико-математичних
наук

ВСТУП

Статистичні опитування розробників сучасного програмного забезпечення [1,2] показали, що мікросервісна архітектура вважається найпрактичним підходом до керування великомасштабними додатками.

Розбиття структури застосунку на велику кількість функціональних частин не тільки дозволяє розділити різні домени сутностей і ізолювати окремі частини бізнес логіки, а й підвищує автономію команд розробників у R&D, щоб надає змогу працювати в окремих депозитаріях коду паралельно. Саме тому сучасні високонавантажені системи часто побудовані з використанням мікросервісної архітектури.

Надійність високонавантажених систем – ключова характеристика, що забезпечує їм здатність функціонувати навіть в умовах динамічних навантажень, локальних збоїв

окремих компонентів і несподіваних втрат доступності.

Відмовостійкість – критично важливий критерій надійності, що забезпечує здатність системи коректно функціонувати навіть у разі виходу з ладу окремих компонентів або втрати доступу до певних обчислювальних вузлів [3].

Мікросервісна архітектура (рис. 1) надає переваги при необхідності ізоляції збоїв і підтримці безперервної роботи у випадку часткових відмов.

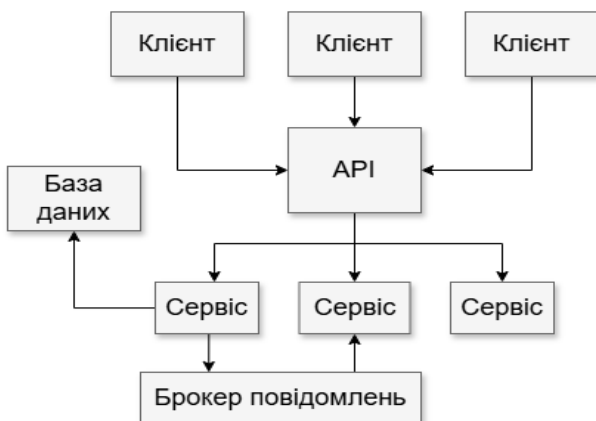


Рис.1. Приклад мікросервісної архітектури високонавантаженої системи [4]

До того ж розподіл функціональності між незалежними сервісами і децентралізація створюють передумови для досягнення оптимальної продуктивності і адаптивності системи. Це, дозволяє значно покращити стабільність роботи застосунків, що функціонують у середовищах з високими вимогами до безперервності і затримок в умовах змінних навантажень [4].

Проте, велика кількість незалежних мікросервісів ускладнює контроль за їхньою взаємодією, оскільки відмова окремих сервісів може бути не одразу виявлена без відповідного спостереження за системним станом. Крім того, розподілений характер мікросервісних додатків може створювати такі системні аномалії, як каскадні відмови [5], що створює нові виклики у забезпеченні надійності, а саме висуває на перший план задачу ефективної оркестрації і моніторингу компонентів. Незалежність мікросервісів робить компоненти системи значною мірою залежними від комунікації, що посилює властивість емерджентності системи і може

призводити до значних непередбачуваних негативних наслідків [6]

У відповідь на низку зазначених ризиків, що пов'язані з доступністю застосунку, для зменшення наслідків збоїв в мережі, системних відмов, різких змін навантаження (інтенсивності використання функціоналу користувачами) і порушень безпеки часто застосовують шаблони відмовостійкості.

Існує багато програмних бібліотек і фреймворків [7, 8], що пропонують для деяких шаблонів різні імплементації (реалізації), які розробники програмного забезпечення можуть використовувати «з коробки», змінюючи значення змінних у конфігурації, що надається бібліотекою.

Також існує низка різних шаблонів відмовостійкості, що класифікуються за різними категоріями [7–9]. Проте це дослідження сфокусоване на покращенні тих шаблонів, що безпосередньо впливають на синхронну комунікацію між сервісами.

Серед шаблонів, які опинилися в полі цього дослідження [7, 9]: Timeout; Circuit Breaker; Retries; Fallbacks; Bulkheads; Rate Limiters. В роботі [7] на основі аналізу цих шаблонів для подальшого вдосконалення було виокремлено Circuit Breaker (CB). Також у [7] було запропоновано нову реалізацію цього методу – предиктивну модель патерну Circuit Breaker, і виконано порівняння запропонованої моделі з загальновідомим, реалізованим на базі [8], Circuit Breaker.

У цій реалізації шаблону, для оцінки поточної надійності зв'язку між сервісами використано такі метрики на основі даних про нещодавні виклики: Failure rate (рівень відмов); Slow call rate (низька швидкість запитів); Success call rate (рівень успішних запитів); Time in Open State (час у відкритому стані).

Запропонована в [7] предиктивна модель патерну Circuit Breaker спрямована на оптимізацію синхронної комунікації двох мікросервісів шляхом прогнозування стану їх взаємодії і зменшення затримки переходу між станами Circuit Breaker, що покращує статистику успішності запитів. Однак, цю модель Circuit Breaker можна ще

вдосконалити в напрямку покращення її адаптивності до змін навантаження.

ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВСТІЙКОСТІ МІКРОСЕРВІСІВ

Передумови вдосконалення методу СВ

Динамічне навантаження на мікросервіс високонавантаженої системи – це типове явище, що залежить від контексту, в якому працює система.

Саме тому більшість сучасних реалізацій Circuit Breaker працюють на основі ковзного вікна даних, що тримає контекст певного розміру за заданим часом або кількістю викликів в залежності від його типу [8, 10]:

- Count-based sliding window (ковзне вікно на основі кількості запитів);
- Time-based sliding window (ковзне вікно на основі часових проміжків);

Кожен тип вікна тримає контекст за певною кількістю останніх викликів, але всі ці реалізації надають статичний розмір вікна.

Контекст оновлюється на базі даних статистичних останніх запитів і показників продуктивності, що використовуються для оцінки поточної надійності зв'язку між сервісами.

Деякі існуючі фреймворки і бібліотеки пропонують механізм вилучення «поганих екземплярів», але також без автоматичного налаштування розміру вікна. В цій роботі для вдосконалення предиктивної моделі патерну СВ [7] запропоновано динамічне регулювання розміру ковзного вікна на основі поточного навантаження на сервіс. Таке налаштування надає змогу адаптувати контекст до природних коливань трафіку.

Поточним називається навантаження, що спостерігається в поточний інтервал часу.

Для реалізації цієї ідеї, до предиктивної моделі патерну СВ, додано контролер, який змінює цільовий розмір ковзного вікна відповідно до поточних показників інтенсивності викликів функціоналу сервісу.

Це, своєю чергою передбачає:

- розробку алгоритму для адаптивного налаштування розміру вікна даних;

- розробку математичної моделі для обчислення розміру ковзного вікна, на основі якого працює СВ [7, 8].

Алгоритм адаптивного налаштування розміру ковзного вікна вікна даних

В основу роботи контролера, покладено алгоритм, що періодично виконує:

- 1) обчислення поточного навантаження;
- 2) експоненціальне згладжування обчисленого поточного навантаження;
- 3) обчислення цільового розміру вікна;
- 4) обчислення відносної зміни порогу гістерезису;
- 5) перевірка умови оновлення розміру цільового вікна;
- 6) оновлення цільового розміру вікна, при умові перевищення його відносної зміни порогу гістерезису.

Початкове значення розміру вікна W_0 налаштовується під час запуску програми.

Адаптація математичної моделі

1. Обчислення поточного навантаження виконується за формулою (1):

$$\hat{\lambda}_t = \frac{n_t}{\Delta}, \quad (1)$$

де: n_t – кількість запитів за заданий інтервал часу Δ , а $\hat{\lambda}_t$ – поточне навантаження.

2. Експоненціальне згладжування обчисленого поточного навантаження, що виконується для стабілізації короточасних шумів і отримання згладженої пропускну здатності, виконується за формулою (2):

$$\lambda_t = (1 - \gamma)\lambda_{t-1} + \gamma\hat{\lambda}_t, \quad \gamma \in (0,1), \quad (2)$$

де: λ_t – згладжене навантаження в момент часу t ; λ_{t-1} – згладжене навантаження в попередній часовий інтервал; $\hat{\lambda}_t$ – поточне навантаження; γ – коефіцієнт згладжування.

3. Обчислення розміру вікна в момент часу t виконується за формулою (3):

$$W_{target,t} = clip(\alpha\lambda_t, W_{min}, W_{max}), \quad (3)$$

де: $W_{target,t}$ – цільовий розмір ковзного вікна в момент часу t ; α – коефіцієнт

масштабування, що контролює пропорційну зміну розміру ковзного вікна відносно навантаження; λ_t – згладжений розмір навантаження в момент часу t ; $clip$ – функція обмеження розміру вікна; W_{min} і W_{max} – нижня і верхня межі дозволеного розміру вікна, що запобігають надмірному стисненню і розширенню.

4. зміни порогу гістерезису виконується за формулою (4):

$$\varepsilon_t = \frac{|W_{target,t} - W_{t-1}|}{W_{t-1}}, \quad (4)$$

де ε_t – відносна зміна навантаження в момент часу t ; W_{t-1} – розмір ковзного вікна з попереднього інтервалу; $W_{target,t}$ – розмір ковзного вікна (до переналаштування).

5. Розмір вікна оновлюється згідно з (5):

$$W_t = W_{target,t} \text{ if } \varepsilon_t > \varepsilon; \\ \text{otherwise } W_t = W_{t-1}, \quad (5)$$

де W_t – розмір вікна, що застосовується в момент часу t ; W_{t-1} – розмір ковзного вікна з попереднього інтервалу; $W_{target,t}$ – нове значення розміру ковзного вікна до переналаштування; ε – поріг гістерезису, який визначає мінімальну відносну зміну, що необхідна для оновлення поточного W_{t-1} значення на обчислене W_t .

Умова оновлення розміру ковзного вікна потрібна для уникнення невиправдано частих коливань, які можуть бути викликані мінорними змінами в трафіку.

6. Оновлення розміру ковзного вікна запускається в окремому від основних процесів роботи Circuit Breaker потоці, або ініціюється фоновим планувальником через спеціальний таймер.

Період оновлення розміру ковзного вікна визначається відповідно до потреб системи.

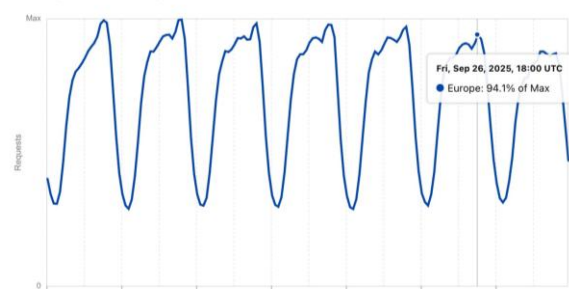
Приклад роботи алгоритму

На рис. 2 показано динаміку HTTP запитів, що відповідає реальній статистиці добових коливань трафіку серверів Cloudflare у Європі протягом тижня у вересні 2025 року [11].

З рис.2 видно як інтенсивність трафіку перевищує 90% вдень (рис. 2, а), а вночі зменшується до 30% (рис. 2, б).

HTTP requests time series for Europe

HTTP requests over time



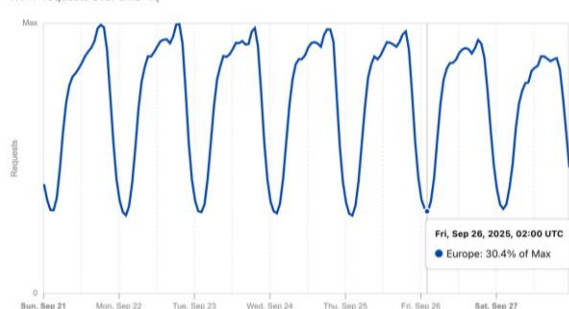
Cloudflare Radar

Sep 21, 2025, 00:00 UTC → Sep 27, 2025, 23:45 UTC

а

HTTP requests time series for Europe

HTTP requests over time



Cloudflare Radar

Sep 21, 2025, 00:00 UTC → Sep 27, 2025, 23:45 UTC

б

Рис. 2. Статистика добових коливань HTTP запитів до серверів Cloudflare у Європі [11]

На рис. 3 показано приклад динаміки розміру адаптивного і статичного ковзних вікон в умовах періодичних навантажень.

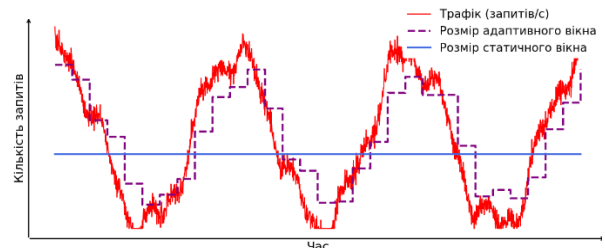


Рис. 3. Приклад динаміки розміру адаптивного і статичного ковзних вікон

З рис. 3 видно, що запропонований алгоритм адаптує розмір ковзного вікна відповідно до поточного навантаження, а саме:

- Якщо навантаження на мікросервіс зростає, то розмір вікна збільшується;
- Якщо навантаження спадає, то розмір вікна зменшується.

Залежність динаміки розміру ковзного вікна від трафіку даних надає ширший контекст для аналізу стану комунікації між

сервісами у порівнянні з статистичними вікнами, що нечутливі до цих змін.

Таким чином «пробна перевірка» роботи алгоритму показала, що алгоритм відповідає очікуванням.

Проте, в цьому дослідженні залишилися невіршеними задачі:

- експериментальної оцінки здатності предиктивної моделі патерну СВ адаптуватися до реальних змін робочого навантаження;
- порівняння ефективності роботи предиктивної моделі патерну СВ в різних сценаріях роботи високонавантажених систем, в тому числі використовуючи поєднання цієї реалізації шаблону з іншими патернами відмовостійкості.

Для порівняння результатів цих експериментів пропонується використати метрики рейтингу комунікації сервісів: Slow call rate, що показує низьку швидкість запитів; Success call rate, яка відображає рівень успішних викликів; Time in the Open state, яка показує час відкритого стану Circuit Breaker; Permitted call rate, що показує кількість дозволених до виконання Circuit Breaker спроб запитів з тих що записані в ковзному вікні; Consecutive failure streak, яка відображає поточну серія послідовних невдач.

Таким чином, перспективою подальших розробок є експериментальні дослідження, в яких запропонований алгоритм буде використано в різних прикладних сценаріях.

ВИСНОВКИ

1. Основним результатом дослідження є алгоритм налаштування розміру цільового ковзного вікна, в основу роботи якого покладено математичну модель, що розроблена для застосування предиктивною моделлю патерну Circuit Breaker.

2. Запропонований алгоритм адаптує розмір цільового ковзного вікна відповідно до поточного навантаження на мікросервіс системи, використовуючи експоненційне згладжування і поріг гістерезису для уникнення занадто частих і різких змін розміру контексту.

3. Для оцінки ефективності алгоритму в складніших конфігураціях мікросервісів заплановано проведення експериментальні досліджень, в яких його буде використано в різних прикладних сценаріях.

REFERENCES

1. **Stack Overflow.** (2024). Stack Overflow Developer Survey 2023. <https://survey.stackoverflow.co/2023/>
2. **JetBrains.** (2024). General Development Trends - The State of Developer Ecosystem in 2023 infographic. <https://www.jetbrains.com/lp/devecosystem-2023/development/>
3. **Siunduh M. E. S., Otieno, M. V. M., Mbugua P. S.** (2025). Fault-Tolerant Software architecture: A comprehensive analysis of design patterns, implementation strategies and performance evaluation. Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15868925>
4. **Bugrov A. A., Terenchuk S. A.** (2023). Principi i metodi avtomatichnogo masshtabuvannja visokonavantazhenih sistem. *Shljahi pidvishhennja efektivnosti budivnictva v umovah formuvannja rinkovih vidnosin*, 52(3), 217-226. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(3\).217-226](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(3).217-226)
5. **Soldani J., Forti S., Roveroni L., Brogi A.** (2024). Explaining microservices' cascading failures from their logs. *Software Practice and Experience*, 55(5), 809–828. <https://doi.org/10.1002/spe.3400>
6. **Lewis J., Fowler M.** (2014). Microservices. <https://martinfowler.com/articles/microservices.html>
7. **Hlybovets A., Paprotskyi I.** (2024). Increasing the fault tolerance in microservice architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 60(3), 480–488. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00689-0>
8. **Resilience4j.** (2025). Introduction. <https://resilience4j.readme.io/docs/getting-started>
9. **Nygard M. T.** (2018). Release it!: Design and Deploy Production-Ready Software (2nd ed.). *The Pragmatic Programmers LLC.*
10. **Resilience4j.** (2025). Circuit Breaker. <https://resilience4j.readme.io/docs/circuitbreaker>
11. **Cloudflare** (2025). Data Explorer | CloudFlare Radar. (2025, September 21). https://radar.cloudflare.com/explorer?dataSet=http&dt=2025-09-21_2025-09-27&loc=europe.

Improving the Fault Tolerance of Microservices in Highly Loaded Systems Based on Load Monitoring

Ihor Paprotskyi, Anatolii Pashko

Abstract. The article investigates the problem of configuring communication between servers in high-load systems that operate under periodic conditions. The primary attention is on fault-tolerance patterns that directly affect synchronous communication between services. The study focuses on the Circuit Breaker method, which formalizes the analogy to a real circuit breaker for fault control and isolation in distributed systems.

The goal of the work is to increase the fault tolerance of a microservice by dynamically adjusting the sliding data collection window size, enabling the context to adapt to current traffic fluctuations.

To achieve this goal, a mathematical model for calculating the target sliding window size has been developed based on the load analysis over the

observed time interval and incorporated into Circuit Breaker.

The algorithm periodically calculates and adapts the size of the sliding data collection window to traffic fluctuations in the system, based on current load calculations and exponential smoothing, as described in the proposed model.

The practical significance of the results obtained is seen in the possibility of implementing new algorithms to improve the communication rating of microservices in highly loaded systems, which will allow for increasing their fault tolerance and ensuring system stability under different load conditions. The scientific novelty lies in the further development of the methodology for increasing the fault tolerance of microservices in highly loaded systems, based on the determination of their interaction state using statistical data from previous requests and their outcomes.

Keywords: adaptivity, Circuit Breaker, fault tolerance pattern, synchronous communication, sliding window, traffic.

Adaptive Hybrid Rollups: AI-Guided Routing between ZK and Optimistic Verification

Mykola Malenko¹

¹Kyiv National University of Construction and Architecture,
Air Force Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03037
malenko.mv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7360-7749>

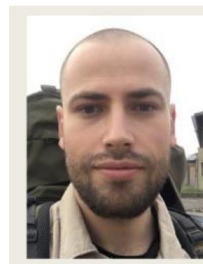
Received 07.10.2025, accepted 28.11.2025
<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1206>

Abstract. This article examines the limitations of existing hybrid rollup solutions and presents an adaptive L2 architecture model that leverages artificial intelligence mechanisms. It is shown that current approaches to combining optimistic and ZK verification are largely based on static rules or manual mode selection, which prevents them from effectively accounting for load dynamics, risk profiles, and domain-specific properties of applications. Based on an analysis of optimistic, ZK, and hybrid rollups, an adaptive hybrid rollup model with AI-based transaction routing is proposed. This model combines transaction classification, GNN-based decision making, LSTM-based network condition forecasting, a dual-path execution system, and a continuous learning module. The article describes a Predictive Routing Algorithm that performs proactive selection between ZK and optimistic paths, taking into account cost, latency, security, and risk profile, as well as a Dynamic Resources Allocation mechanism that dynamically redistributes resources between the paths. The proposed multi-criteria optimization framework demonstrates the ability to tune objective weights to the specifics of different classes of DeFi and Web3 protocols. It is shown that the implementation of such a model is promising for systems with high transactional intensity, as it enables a shift from manual configurations to automated, data-driven policies for resource and risk management in hybrid rollup architectures.

Keywords: web3, adaptive hybrid rollups, artificial intelligence, blockchain.

INTRODUCTION

Contemporary blockchain networks face a fundamental scalability challenge that limits their widespread adoption in the global digital economy. The Ethereum network is capable of processing only 15-30 transactions per second



Malenko Mykola
Post Graduate Student,
department of cyber security
and computer engineering

at the base layer [1, 2], while centralized payment systems demonstrate throughput that exceeds this metric by several orders of magnitude [1]. Limited throughput leads to network congestion and significant increases in transaction costs [2], creating a barrier to mass adoption of blockchain technology.

Layer-2 solutions, particularly rollups, successfully reduce the load on the main blockchain, offering more scalable infrastructure [3]. Among rollup technologies, optimistic rollups and zero-knowledge proof rollups have gained the widest adoption [4]. Optimistic rollups, including Arbitrum and Optimism, provide full compatibility with the Ethereum Virtual Machine and low transaction costs ranging from \$0.10 to \$0.30 [4, 5], however they have a significant limitation in the form of a seven-day waiting period for final confirmation [6, 7]. ZK-rollups, such as zkSync Era and StarkNet, ensure faster transaction finality and efficient data compression [8, 9, 10, 11], but the generation of cryptographic proofs requires significant computational resources, which is reflected in higher transaction costs [5].

Analysis of existing solutions reveals a fundamental shortcoming in the form of absence of mechanisms for adaptation to the specifics of individual transactions and

dynamic network conditions. Both optimistic and ZK-rollups apply a single verification strategy to all operations regardless of their value, urgency, or security requirements [1]. Initial attempts to overcome these limitations are represented by static hybrid architectures, however these systems remain constrained by predefined routing rules and are unable to dynamically adapt to changes in network load [12, 13, 14].

Systematic reviews demonstrate successful application of machine learning methods for optimizing various aspects of blockchain systems, including consensus mechanisms and dynamic optimization of resource allocation [15, 16, 17]. However, the potential for applying artificial intelligence for intelligent routing between different verification mechanisms in rollups remains insufficiently explored in scientific literature [18].

The objective of this work is a systematic analysis of the possibilities and prospects for creating adaptive hybrid rollup systems that utilize artificial intelligence for dynamic routing of transactions between zero-knowledge verification and optimistic verification mechanisms. The research is aimed at developing a conceptual architecture of an adaptive hybrid system, analyzing the possibilities of its practical application, theoretical prediction of efficiency, and evaluation of the technology's development prospects.

REVIEW OF ROLLUP TECHNOLOGIES

Optimistic Rollups

Optimistic rollups represent a second-layer scaling technology based on the assumption of network participant honesty. Unlike traditional approaches that require active verification of each transaction, optimistic rollups proceed from the presumption of operation correctness until proven otherwise [19]. This architectural feature provides a significant increase in throughput while maintaining an acceptable level of security through the fraud proof mechanism.

The architecture of optimistic rollups presupposes the presence of two key roles:

sequencers, responsible for collecting and processing transactions, and verifiers, who oversee the network and initiate challenge procedures upon detection of incorrect operations [20]. Sequencers ensure the batching of a significant number of transactions into batches, which are subsequently published in the main blockchain together with a new state root. A critical feature of this process is that sequencers must deposit collateral to participate in the network, which can be confiscated in case of detection of malicious behavior [20]. The fraud proof mechanism constitutes a fundamental element of optimistic rollup security. After publication of a transaction batch, a challenge period begins, during which any network participant can initiate a procedure to verify the correctness of proposed state changes [6]. Modern implementations of optimistic rollups utilize interactive fraud proofs, which require several rounds of interaction between the sequencer and challenger to determine the specific instruction that caused the error [21]. This approach significantly reduces the cost of verification compared to non-interactive proofs, which require re-execution of all batch transactions on the first layer. The challenge period traditionally amounts to approximately seven days in leading optimistic rollups, including Arbitrum, Base, and Optimism [6, 7, 19, 20]. This duration is necessitated by the need for protection against economic censorship attacks, where an attacker may attempt to block challenge submission through bribing block producers [21]. Research shows that to ensure successful completion of the challenge period in the presence of economic censorship, the period duration must exceed one week, proceeding from the assumption that the Ethereum community will implement a social response in the form of a hard fork of the chain within this timeframe [21].

The main advantage of optimistic rollups is their compatibility with the Ethereum Virtual Machine and relatively low transaction costs. Following the implementation of the EIP-4844 upgrade, which introduced specialized data storage space in the form of blobs, the average transaction cost in optimistic rollups decreased to a range from \$0.10 to \$0.30 [22]. This is

achieved due to the fact that optimistic rollups do not require generation of complex cryptographic proofs for each transaction batch, which reduces computational costs and accelerates the processing procedure [6].

However, optimistic rollups have significant limitations that constrain their widespread adoption in time-sensitive applications. The most critical problem is the delay in final transaction confirmation, which can reach seven days as a result of the necessity to wait for completion of the challenge period [7]. This creates difficulties for users when withdrawing funds from the second layer to the main blockchain and limits the technology's applicability for cases requiring rapid finality. An additional limitation is dependence on the presence of honest network participants capable of detecting and challenging fraudulent transactions, which creates additional requirements for decentralization and verifier activity [6]. Contemporary research, particularly the Dynamic Fraud Proofs protocol, proposes the possibility of applying dynamic fraud proofs to reduce the challenge period under ideal conditions [23]. This approach presupposes adaptive modification of the challenge period duration depending on verifier activity and absence of disputes, which could potentially improve user experience without compromising system security. However, full implementation of this concept requires additional research regarding economic incentives and cryptoeconomic resilience.

Zero-Knowledge Proof Rollups

Zero-knowledge proof rollups represent an alternative approach to blockchain scaling based on the use of cryptographic proofs for verification of computation correctness without revealing transaction details. Unlike optimistic rollups, ZK-rollups actively generate and verify validity proofs for each transaction batch, ensuring instant finality and a higher level of security [8]. The architecture of ZK-rollups includes several key components: a sequencer responsible for processing transactions off-chain, a proof generator that creates cryptographic confirmations of computation

correctness, and a smart contract on the first layer that verifies submitted proofs [10]. The transaction processing procedure begins with collecting operations into a batch, after which the proof generator creates a succinct cryptographic proof confirming the correctness of the state transition. This proof, together with compressed transaction data, is published on the main blockchain, where the smart contract performs verification and updates the state root [10]. There are two main types of zero-knowledge proofs applied in ZK-rollups: zk-SNARKs and zk-STARKs, each of which has unique characteristics, advantages, and trade-offs [24, 25].

A key advantage of ZK-rollups is the possibility of instant transaction confirmation without the need to wait for a challenge period. After the validity proof is verified by the smart contract on the first layer, the new state is considered final and immutable [8]. This allows users to quickly withdraw funds from the second layer, typically within 10-30 minutes, which represents a cardinal improvement compared to the seven-day waiting period in optimistic rollups [6, 10]. An additional advantage is significant data compression achieved through the use of cryptographic proofs. Instead of publishing complete data about each transaction, ZK-rollups publish only succinct proofs and minimal information necessary for state recovery [10]. This leads to a reduction in load on the main blockchain and improvement of overall ecosystem scalability. Research shows that ZK-rollups can achieve data compression at a level of 90% compared to publishing all transactional data [11].

However, generation of zero-knowledge proofs requires significant computational resources, which is reflected in higher transaction costs compared to optimistic rollups. Analysis of practical implementations demonstrates that the average transaction cost in ZK-rollups fluctuates in a range from \$0.50 to \$1.00 under normal conditions, with the possibility of growth to \$3-10 during high first-layer congestion [5]. This creates an economic barrier for applications with high frequency of low-value transactions, particularly micropayments and gaming applications. An additional challenge is the complexity of

ensuring compatibility with the Ethereum Virtual Machine. Development of zkEVM capable of generating proofs for execution of arbitrary smart contracts presents significant technical difficulties due to the complexity of EVM instructions and the necessity of their representation in the form of arithmetic circuits [26, 27]. There are various approaches to zkEVM implementation with different levels of compatibility: from full EVM equivalence allowing direct deployment of existing contracts, to specialized virtual machines optimized for proof generation [27]. The risk of centralization also constitutes a substantial problem for ZK-rollups. Proof generation often requires specialized hardware, which can lead to concentration of this function in the hands of a limited number of operators [28]. This creates potential vulnerability to transaction censorship and manipulation of their execution order, which contradicts the principles of blockchain system decentralization. Contemporary research is focused on developing decentralized networks of proof generators and mechanisms for incentivizing participation of multiple independent operators [28].

Hybrid Rollups

Awareness of the limitations of both optimistic and ZK-rollups has led to the development of hybrid architectures that seek to combine the advantages of both approaches. These solutions represent diverse strategies for integrating verification mechanisms, from conceptual models of seamless transition between proof types to practical implementations with artificial intelligence integration at the sequencer level. A brief overview of key hybrid projects is presented in Table 1.

The considered hybrid solutions, despite the innovation of architectural decisions, are characterized by the static nature of decision-making regarding the choice of verification method [12, 13, 14]. The systems use fixed routing criteria that do not account for dynamic changes in operating conditions: current network load, gas cost on the first layer, specific

transaction requirements regarding confirmation speed or security level. Such absence of adaptivity leads to suboptimal resource utilization, when the system applies an excessively expensive verification mechanism for simple operations or an insufficiently secure approach for critical transactions.

Potential of Adaptive Hybrid Architectures

Research on the application of machine learning methods for optimization of blockchain systems demonstrates the potential of artificial intelligence algorithms for dynamic optimization of resource allocation, where ML approaches notably outperform static management schemes [15, 16, 17]. In parallel, the integration of AI and blockchain is at the stage of active development: thousands of repositories, scientific publications, and double-digit growth rates of the solutions market at the intersection of these technologies indicate the formation of a separate research direction [15, 16, 17]. The evolution of this combination proceeds from initial theoretical analysis and prototypes to implementation in practical scenarios – from finance and energy to the Internet of Things. Against this background, concepts such as optimistic machine learning (opML), hybrid consensus with ML components, and AI analysis of market data demonstrate the technical feasibility of incorporating AI into critical circuits of blockchain infrastructure [17, 29].

At the same time, the potential for applying AI specifically for intelligent routing between different verification mechanisms in rollups remains insufficiently explored. Existing systems do not provide context-dependent balancing between cost, speed, and security: critical high-value transfers and routine microtransactions are processed according to the same logic, without consideration of risk profile, deadlines, or application domain [12, 13, 14]. Advanced mechanisms for predicting network load and personalizing priorities for different categories of users and protocols are also absent: DeFi liquidation scenarios require maximum security and fast finality, while

Table 1. Comparative characteristics of static hybrid solutions

Project	Hybrid Approach	Unique Feature	Finality Time
ZKM	Entangled Rollups based on zkMIPS with configurable selection between optimistic and ZK-verification [12]	Universal zkVM allows users to choose withdrawal mode: fast with higher cost or slower with lower costs [12]	10-30 min (ZK) or 7 days (optimistic)
BOB	Combining Bitcoin security with Ethereum programmability through OP Stack and Bitcoin finality mechanism [13]	Hybrid ZK-proofs for state verification combined with BitVM for trust-minimized bridge to Bitcoin [13]	Depends on phase: ETH L2 (7 days) / BTC finality (in development)
Morph	Responsive Validity Proof (RVP): optimistic architecture with reactive ZK-proof generation [14]	Sequencer generates ZK-proof only upon challenge, which reduces verification period and lowers data publication costs [14]	1-3 days
Zircuit	Integration of ZK-proofs with AI security monitoring at sequencer level [30]	Specialized sequencer with automated AI mechanisms for proactive detection of malicious transactions and vulnerability exploitation [31]	10-30 min (ZK)

gaming applications can tolerate additional delay for the sake of cost reduction. The lack of flexible, formalized service level agreements (SLA) limits the ability of current rollup architectures to effectively serve the heterogeneous requirements of contemporary decentralized applications.

Technical and organizational limitations of AI integration with blockchain – high cost and latency of executing complex models on-chain, requirements for privacy, scalability and interoperability, as well as ethical questions of algorithm fairness [17, 18] – indicate the necessity for intellectually adaptive hybrid architectures. In such systems, AI does not replace basic cryptographic guarantees, but acts as a superstructure that analyzes transaction context, current and predicted network state, and participant priorities, forming decisions about the choice of verification mechanism and resource allocation. Against the background of expected growth in transaction volumes and diversification of blockchain usage scenarios [4, 5], the development of such intellectually adaptive hybrid rollups emerges as a critical direction for further research, aimed at combining the advantages of AI and Web3

without loss of fundamental properties of decentralized systems.

ADAPTIVE HYBRID ROLLUP MODEL WITH AI-BASED TRANSACTION ROUTING

Key Principles and Components of the Adaptive Hybrid Rollup Model with Intelligent Routing

Analysis of existing hybrid solutions reveals a fundamental limitation: the static nature of decision-making regarding the choice of verification mechanism. BOB allows users to manually choose between standard withdrawal and validity proof on demand, which transfers decision complexity to the end user [13]. Morph applies a reactive approach through Responsive Validity Proof, generating ZK-proofs only upon challenge occurrence, but does not provide for preventive optimization [14]. ZKM offers a configurable mechanism for selection between optimistic and ZK-verification, however configuration is performed at the system level rather than individual transaction level [12].

The proposed model is based on three principles that distinguish it from static hybrid solutions:

1. *full automation* - the system independently makes optimal decisions for each transaction without user or application developer intervention;
2. *principle of proactive adaptation* - the system not only reacts to current conditions, but also predicts future changes in network load and preventively redistributes resources;
3. *principle of continuous learning* - ensures constant improvement of decision quality through analysis of previous operation results and model adaptation to the specifics of different application types.

The enumerated principles are implemented through an architecture of five interconnected components:

1. transaction analysis and classification module;
2. AI decision-making core;
3. dual-path execution system with dynamic load balancing;
4. network conditions prediction module;
5. continuous learning system with feedback loop.

The transaction lifecycle in the proposed adaptive hybrid model is depicted in Figure 1.

Collectively, these principles and architectural components form an adaptive hybrid rollup model capable of real-time selection of the optimal transaction processing path and evolution in accordance with dynamic network conditions and application protocol requirements.

AI Routing Mechanism

The proposed AI routing mechanism implements automatic selection of the processing path for each transaction without the need for user participation. The core of the system is a Graph Neural Network that processes fourteen parameters through a dependency graph, where nodes represent transaction parameters and network state, and edges reflect their interrelationships [32]. Parameters are divided into 5 groups.

The first group of parameters includes financial metrics: transaction value in USD equivalent, current gas price on the first layer, gas price forecast for the next four hours based

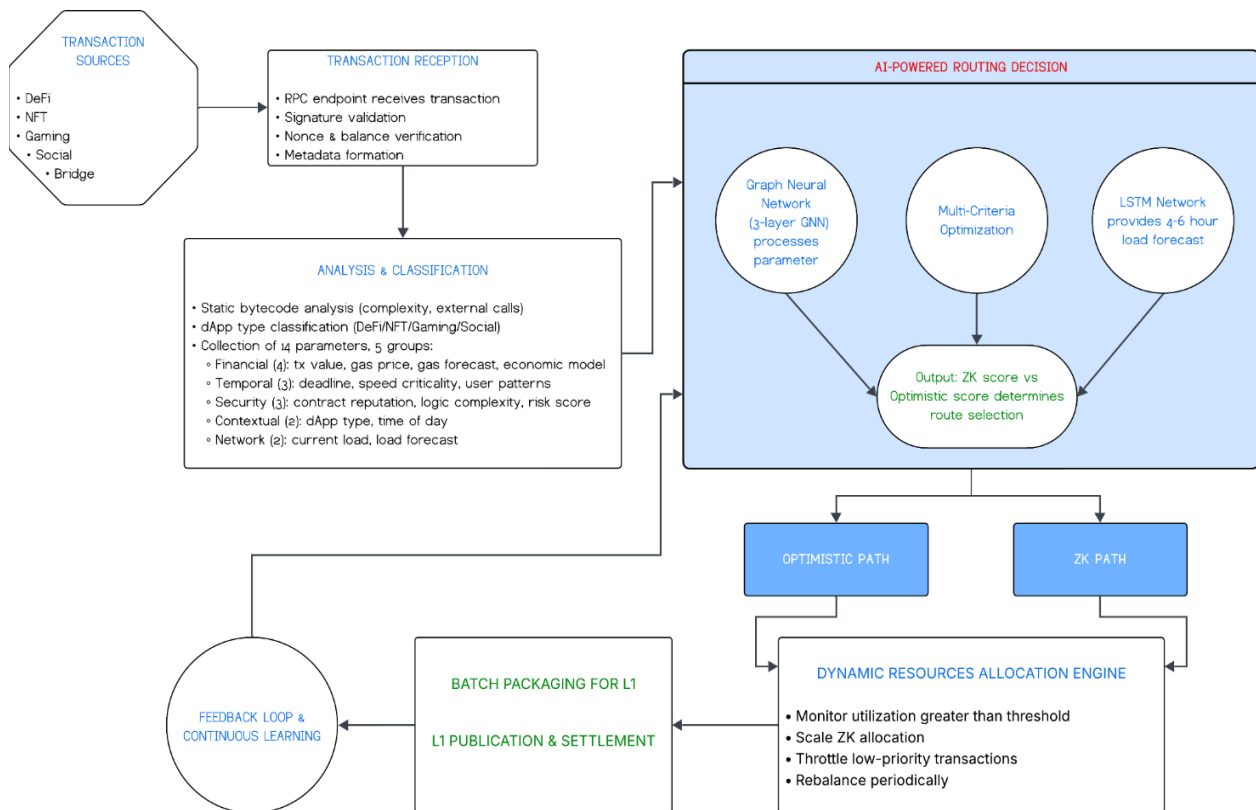


Fig. 1. Transaction flow in adaptive hybrid rollup architecture

on LSTM model, and economic model of the application. The second group encompasses temporal requirements: explicitly specified user deadline, speed criticality for application type (DeFi requires speed, gaming tolerates delays), and historical usage pattern of a specific user. The third group of parameters concerns security: smart contract reputation score based on audit history and incidents, transaction logic complexity determined through static bytecode analysis, and risk profile of sender address. The fourth group includes contextual data: application type (DeFi, NFT marketplace, gaming, social), time of day and day of week for detecting cyclical load patterns, and correlation with activity on other Layer 2 networks. The fifth group encompasses network conditions: current load of ZK and optimistic paths, transaction queue sizes, available throughput in both directions, and load forecast based on historical data of analogous periods [15, 16, 17].

In the proposed model, an important role is played by the Predictive Routing Algorithm, which transitions the system from a reactive to a proactive approach to transaction routing. The system uses an LSTM model with three layers to predict network load four to six hours ahead based on historical data from the previous six months [15, 16, 17]. The model accounts for cyclical patterns: daily activity peaks during opening of American and Asian markets, weekly patterns with higher activity in mid-week, and seasonal trends. If a period of high load is predicted, the system preventively redistributes non-critical transactions to the optimistic path 30-60 minutes before the expected peak, reserving ZK capacity for critical operations. The proposed strategy has the potential to significantly reduce the risk of ZK-path overload during peak load periods while simultaneously lowering average transaction costs compared to the reactive approach.

Dual-path System with Dynamic Balancing

Unlike static hybrid architectures with fixed or minimally adaptive resource allocation, the proposed dual-path system implements fully dynamic balancing of throughput between ZK

and optimistic paths. The ZK-path uses zk-SNARK proofs for transactions requiring fast finality (10-30 minutes) and maximum security, with support for batch processing to amortize costs [10, 24]. The optimistic path applies the presumption of correctness with a dynamic challenge period from 24 hours to 7 days depending on transaction risk profile: operations with verified contracts and low value receive a shortened period, while suspicious or high-value operations are subject to the full seven-day period.

The presence of a Dynamic Resource Allocation mechanism ensures automatic scaling of available resources between paths in real time. The system monitors three key metrics: utilization coefficient of each path's throughput, average queue waiting time, and transaction processing cost. When the ZK-path reaches 80% load, the system automatically increases the share of proof generators allocated to this direction from the baseline level of 30% to a maximum of 70% within

5-10 minutes. In parallel, a throttling mechanism is activated for non-critical transactions: operations with a priority score below 0.3 are automatically redirected to the optimistic path or postponed until load normalization [17]. This approach ensures guaranteed service level for critical operations even during activity peaks, which is difficult or impossible to achieve with static systems.

Adaptive Multi-Criteria Optimization Framework

Traditional approaches to rollup system optimization use static weight coefficients for balancing between cost, speed, and security. The proposed Adaptive Multi-Criteria Optimization Framework introduces temporal dependence of weight coefficients that change in real time based on context. The optimization function is defined as Figure 2.

Fig.2. The optimization function for Adaptive Multi-Criteria Optimization.

$$F(t) = \sum_i w_i(t) \cdot f_i(\text{transaction}, \text{network_state}(t))$$

Where $w_i(t)$ are adaptive weights that evolve through a reinforcement learning mechanism. Instead of a fixed distribution (0.2, 0.3, 0.5) for all DeFi applications, the system learns specific patterns of individual protocols: Uniswap-like DEXs receive higher speed weight (0.15, 0.45, 0.40) due to the importance of execution before price changes, while lending protocols like Aave receive emphasis on security (0.15, 0.25, 0.60). Similarly, for payment stablecoin services, cost and transfer speed become priorities (0.40, 0.40, 0.20). For NFT marketplaces (trading tokenized assets at fixed or auction prices) a more balanced profile is appropriate (0.30, 0.40, 0.30), while for cross-chain bridges and liquidity transfer protocols with high exploit risks, weights are additionally shifted toward security (0.10, 0.20, 0.70).

The system receives feedback through three channels and uses it to adapt weights. Explicit user ratings are collected through an optional rating mechanism after transaction completion, where users can indicate satisfaction with speed, cost, and reliability. Implicit signals are derived from behavioral patterns: if a user repeatedly sends a transaction with higher gas price within 10 minutes after the first attempt, this signals dissatisfaction with speed, and the system increases the speed weight for similar future operations of this user by 0.1. System metrics include the percentage of transactions that did not complete successfully within the expected timeframe, average time from submission to final confirmation, and frequency of challenges in the optimistic path. The reinforcement learning agent uses accumulated reward as a signal for gradient-based updating of weight coefficients hourly, achieving convergence to optimal policy within 7-14 days for a new application type.

WORK SCENARIOS: DEMONSTRATION OF ADAPTIVITY

Scenario 1: Preventive Optimization During Predicted Peak

At 13:00 UTC, the system detects through the LSTM model a high probability (0.87) of an activity peak at 14:30 UTC (NYSE opening). Current load: ZK-path 45%,

optimistic 30%. The system analyzes queues and identifies 340 non-critical transactions (gaming operations, low-value NFT transfers) with a deadline greater than 2 hours. The AI mechanism makes the decision:

1. move 280 non-critical transactions to the optimistic path,
2. increase proof generator allocation for the ZK-path from 30% to 55%,
3. activate priority throttling with a threshold of 0.4 instead of the standard 0.2.

At 14:30 UTC, the expected peak occurs: 1200 new transactions in 15 minutes, 65% of which are DeFi operations. Thanks to preventive optimization, the ZK-path reaches 82% load (not overloaded), average finality time 18 minutes, no critical transaction delayed. Without preventive optimization: predicted load 127%, waiting time > 45 minutes.

Scenario 2: Adaptive Classification Based on Contextual Analysis

Two users send transactions interacting with the same DeFi contract (lending protocol).

User A: borrow operation for 50 ETH, address with 2-year history, 450 successful transactions, reputation score 0.92. User B: borrow operation for 45 ETH, address active for 3 weeks, 12 transactions, reputation score 0.31.

The AI mechanism analyzes the context: both operations are financially significant, but risk profiles differ. Decision: transaction A is routed through the optimistic path with shortened challenge period of 48 hours (high reputation), cost \$0.15. Transaction B is routed through the ZK-path (low reputation = higher risk), cost \$0.85, finality 22 minutes. After a week, user B completes 30 successful operations, reputation score rises to 0.68. The next analogous transaction is automatically routed through the optimistic path, demonstrating system adaptation to behavioral profile changes.

Scenario 3: Continuous Learning Through Feedback Loop

A new gaming application integrates with the system. Initial parameters: baseline weight distribution (0.5, 0.3, 0.2) for gaming category.

First 1000 transactions: the system collects data on implicit signals. Pattern detected: 23% of users repeatedly send transactions with higher gas price, 12% leave negative explicit ratings with complaints about slowness.

The reinforcement learning agent interprets: users of this particular application are more sensitive to speed than typical gaming applications. After 72 hours, the system adapts weights to (0.35, 0.50, 0.15), increasing the share of transactions routed through the ZK-path from 8% to 22%.

Next 1000 transactions: frequency of negative feedback decreases to 7%, satisfaction indicator grows from 3.2 to 4.1 out of 5. The system continues fine-tuning, achieving optimal weights (0.32, 0.53, 0.15) after 14 days, after which it reaches a stable state with periodic micro-adjustments.

CONCLUSIONS

Summarizing the results, it can be stated that the proposed adaptive hybrid rollup model represents a conceptually new approach to organizing Layer 2 solutions, which differs from existing static systems in three key principles: full automation of decision-making at the individual transaction level instead of manual selection (BOB) or system configurations (ZKM); proactive adaptation through prediction of future network conditions instead of reactive response (Morph RVP); continuous learning through reinforcement learning with adaptation to the specifics of different application types.

To implement these principles, a five-module architecture has been developed that integrates an analysis module with fourteen transaction classification parameters, an AI core based on Graph Neural Network, a dual-path execution system with Dynamic Resource Allocation mechanism, an LSTM prediction module, and a continuous learning system through feedback loop. Theoretical analysis indicates potential advantages: reduction in transaction costs through dynamic distribution between ZK and Optimistic paths, reduction of

delays during peaks through preventive resource redistribution, improvement in routing quality through adaptation to protocol specifics, as well as elimination of the need for technical understanding of verification mechanisms on the part of users.

The model proves particularly appropriate for DeFi protocols with operations varying in criticality, gaming and social applications with mass low-cost transactions, cross-chain bridges with automatic balancing of security and speed, as well as payment systems with high transactional intensity.

At the same time, despite the conceptual attractiveness of the proposed model, there exists a number of unresolved questions that require in-depth investigation and may limit the practical applicability of the approach. Critical priority questions include formal verification of AI component security, as currently there are no formal proofs of system resilience to manipulation by attackers and adversarial attacks on neural networks making routing decisions. Confidentiality of behavioral data constitutes another critical challenge, as learning mechanisms require access to user transaction patterns, which demands development of privacy-preserving approaches to machine learning in the context of public blockchains. High priority is assigned to inference scalability issues, as it is necessary to ensure decision-making latency of less than ten milliseconds even when processing thousands of transactions per second, which may prove to be a technically complex task for sophisticated models such as Graph Neural Networks. Empirical validation of the proposed approach also remains an open question due to the absence of experimental data on the actual effectiveness of the adaptive system compared to static hybrid solutions under real operating conditions. Medium priority questions include development of an economic model with determination of incentive mechanisms for validators and provers under conditions of dynamic load distribution, as well as ensuring compatibility with existing Layer 2 stacks and creating a clear migration path for decentralized applications already functioning on static rollup solutions.

Further development of the model requires implementation of proof-of-concept and empirical testing, formal security analysis, development of privacy-preserving learning mechanisms, investigation of decentralized approaches to AI inference, as well as analysis of economic incentives and game-theoretic properties of the system. Overall, the proposed model represents a conceptual framework for next-generation Layer 2 solutions, where cryptographic verification protocols are integrated with intelligent resource management systems, laying a theoretical foundation for transition from static to adaptive systems that independently optimize the balance between cost, speed, and security. Practical implementation and empirical validation constitute the subject of future research and will determine the boundaries of the approach's applicability in production environments.

REFERENCES

1. **Thibault LT, et al.** Blockchain Scaling Using Rollups: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, vol. 10, 2022, pp. 93039-93054. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3200051>
2. **Park S, et al.** Impact of EIP-4844 on Ethereum: Consensus Security, Ethereum Usage, Rollup Transaction Dynamics, and Blob Gas Fee Markets. *arXiv preprint arXiv:2405.03183*, 2024, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.03183>
3. **Spoto F, et al.** A Survey on Data Availability in Layer 2 Blockchain Rollups: Open Challenges and Future Improvements. *Future Internet*, vol. 16, no. 9, 2024, p. 315. <https://doi.org/10.3390/fi16090315>
4. **Fidelity Digital Assets.** The Rise of Layer 2 Scaling on Ethereum. *Fidelity Digital Assets Research*, 2024. <https://www.fidelitydigitalassets.com/research-and-insights/rise-layer-2-scaling-ethereum>
5. **L2BEAT.** Layer 2 Scaling Solutions Comparison. *L2BEAT Analytics*, 2024. <https://l2beat.com/>
6. **Ethereum Foundation.** Optimistic Rollup Challenges. *ethereum.org*, 2024. <https://ethereum.org/developers/docs/scaling/optimistic-rollups/>
7. **Base Documentation.** Base Challenge Period. *Coinbase*, 2024. <https://docs.base.org/>
8. **zkSync Documentation.** zkSync Era Architecture. *Matter Labs*, 2024. <https://docs.zksync.io/build/resources/era-architecture>
9. **StarkWare.** StarkNet Architecture Overview. *StarkWare Documentation*, 2024. https://docs.starknet.io/documentation/architecture_and_concepts/
10. **Ethereum Foundation.** Zero-knowledge rollups. *ethereum.org*, 2024. <https://ethereum.org/developers/docs/scaling/zk-rollups/>
11. **Polygon.** Polygon zkEVM Data Compression. *Polygon Technology*, 2024. <https://docs.polygon.technology/zkEVM/>
12. **ZKM Documentation.** Hybrid Rollup Architecture. *ZKM Official Documentation*, 2024. <https://docs.zkm.io>
13. **Rockaway X.** BOB: The First Hybrid ZK Rollup That Lets Users Control Their Security. *Medium*, 2024, <https://www.rockawayx.com/insights/bob-becomes-first-hybrid-zk-rollup>
14. **Morph Documentation.** The Optimistic zkEVM Scaling Solution: Responsive Validity Proof. *Morph Docs*, 2024. <https://docs.morph2.io/docs/how-morph-works/responsive-validity-proof/>
15. **Yuan F, et al.** AI-Driven Optimization of Blockchain Scalability, Security, and Privacy Protection. *Algorithms*, vol. 18, no. 5, 2025, p. 263. <https://doi.org/10.3390/a18050263>
16. **Artenie A. C., et al.** Exploring the Synergy Between Ethereum Layer 2 Solutions and Machine Learning to Improve Blockchain Scalability. *Computers*, vol. 14, no. 9, 2025, p. 359. <https://doi.org/10.3390/computers14090359>
17. **Dalila R, Riccardo R, Carla P, Sabina R, et al.** AI-enhanced Blockchain Technology: A Review of Advancements and Opportunities. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 225, 2024, p. 103858. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103858>
18. **Moetez Abdelhamid, Layth Sliman, Raoudha Ben Djemaa, and Guido Perboli, et al.** A Review on Blockchain Technology, Current Challenges, and AI-Driven Solutions. *ACM Computing Surveys*, 2024. <https://doi.org/10.1145/3700641>
19. **Optimism Collective.** Optimism Bedrock Explainer. *Optimism Documentation*, 2024. <https://community.optimism.io/docs/developers/bedrock/>
20. **Arbitrum Documentation.** Fraud Proofs in Arbitrum. *Offchain Labs*, 2024. <https://docs.arbitrum.io/>

21. **Kalodner H, et al.** Arbitrum: Scalable, Private Smart Contracts. USENIX Security Symposium, 2018, pp. 1353-1370, <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity18/presentation/kalodner>
22. **Park S, et al.** EIP-4844 Economic Impact Analysis. arXiv preprint, 2024, <https://arxiv.org/abs/2405.03183>
23. **Picco G., Fortugno A.** Dynamic Fraud Proof. arXiv:2502.10321, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.10321>
24. **Groth J.** On the Size of Pairing-based Non-interactive Arguments. Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, Springer, 2016, pp. 305-326, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-49896-5_11
25. **Ben-Sasson E, et al.** Scalable, Transparent, and Post-quantum Secure Computational Integrity. IACR Cryptology ePrint Archive, 2018, <https://eprint.iacr.org/2018/046.pdf>
26. **Buterin V.** An Incomplete Guide to Rollups. Vitalik.ca, 2021. <https://vitalik.eth.limo/general/2021/01/05/rollup.html>
27. **zkSync Documentation.** zkEVM Compatibility Types. Matter Labs, 2024. <https://docs.zksync.io/>
28. **StarkWare.** Centralization Risks in ZK Rollups. StarkWare Blog, 2024. <https://starkware.co/blog/>
29. **Conway K.D. et al.** opML: Optimistic Machine Learning on Blockchain. arXiv:2401.17555, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.17555>
30. **Derka M. et al.** Sequencer Level Security (SLS). arXiv:2405.01819, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.01819>
31. **Zircuit Documentation.** Sequencer Level Security Deep Dive. Zircuit Docs, 2024. <https://docs.zircuit.com/learn/zircuit-technology/sls>
32. **Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., Yu P.S.** A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, vol. 32, no. 1, pp. 4-24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
33. **Saad M, et al.** Veritas: Layer-2 Scaling Solution for Decentralized Oracles on Ethereum Blockchain with Reputation and Real-Time Considerations. Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 13, no. 1, 2024, <https://www.mdpi.com/2224-2708/13/2/1>
34. **Arbitrum** Documentation. How Arbitrum Works. Offchain Labs, 2024. <https://docs.arbitrum.io/how-arbitrum-works/inside-arbitrum-nitro>
35. **Teutsch J, Reitwießner C.** A Scalable Verification Solution for Blockchains. TrueBit Protocol, 2017. <https://people.cs.uchicago.edu/~teutsch/papers/truebit.pdf>
36. **Wood G.** Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger. Ethereum Project Yellow Paper, 2014, https://mholende.win.tue.nl/seminar/references/ethereum_yellowpaper.pdf
37. **Harz D., Zamyatin A.** BOB: The Hybrid L2 Vision Paper. BOB Documentation, 2024. <https://docs.gobob.xyz/>

**Адаптивні гібридні ролупи:
інтелектуальна маршрутизація між ZK та
оптимістичною верифікацією**

Микола Маленко

Анотація. Дана стаття присвячена дослідженню обмежень сучасних гібридних ролуп-рішень та розробці адаптивної моделі L2-архітектури з використанням механізмів штучного інтелекту. Показано, що існуючі підходи до поєднання оптимістичної та ZK-верифікації здебільшого ґрунтуються на статичних правилах або ручному виборі режиму, що не дозволяє ефективно враховувати динаміку навантаження, ризику та доменні особливості застосунків. На основі аналізу оптимістичних, ZK та гібридних ролупів запропоновано адаптивну гібридну ролуп-модель з ШІ-маршрутизацією транзакцій, яка поєднує класифікацію транзакцій, GNN-базоване прийняття рішень, LSTM-прогнозування мережних умов, dual-path систему виконання та модуль безперервного навчання. Описано Predictive Routing Algorithm, що здійснює проактивний вибір між ZK- та оптимістичним шляхом з урахуванням вартості, затримки, безпеки та профілю ризику, а також механізм Dynamic Resources Allocation, який динамічно перерозподіляє ресурси між шляхами. Запропонований багатокритеріальний фреймворк оптимізації демонструє можливість налаштування ваг цілей під специфіку різних класів DeFi та Web3-протоколів. Показано, що впровадження такої моделі є перспективним для систем із високою транзакційною інтенсивністю, оскільки дає змогу перейти від

ручних конфігурацій до автоматизованих політик керування ресурсами та ризиками, що спираються на аналіз фактичних даних, в гібридних rollup-архітектурах.

Ключові слова: вебЗ, адаптивні гібридні ролапи, штучний інтелект, блокчейн.

AI-based damage mapping for urban infrastructure

*Kostiantyn Marynskyi*¹

¹Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitriflotskyi Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03037
¹marynskyi.kv@knuba.edu.ua

Received 08.10.2025, accepted 11.11.2025
<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1207>

Abstract. Urban infrastructure damage assessment is essential for post-disaster recovery, resource allocation, and city resilience planning. Manual inspections are slow, subjective, and unsafe. This study presents an extended review of computer vision (CV) and geographic information system (GIS) approaches for automated multi-source damage detection. Methods for classification, detection, segmentation, and change detection are analyzed. An expanded AI→Damage Index→GIS pipeline is proposed. Challenges specific to Ukrainian cities are examined. The paper provides a comprehensive foundation for implementing automated damage-mapping systems.

Keywords: computer vision, GIS, damage assessment, segmentation, UAV imagery, reconstruction planning.

INTRODUCTION

Urban environments are highly vulnerable to large-scale disasters, including earthquakes, industrial explosions, and, most notably for Ukraine, warfare-related destruction [12, 20]. Rapid evaluation of infrastructure damage is critical for emergency response, reconstruction scheduling, prioritization of repair budgets, and risk mitigation [7, 13].

Traditional manual inspections pose several problems: low scalability, dependence on expert availability, safety risks, subjective assessments, and delays in compiling city-wide reports [6, 12].

AI-based approaches can process thousands of images per hour and produce consistent, quantitative metrics. When combined with GIS layers such as building footprints, road



Kostiantyn Marynskyi
Assistant, department of cyber security and computer engineering

networks, and population density, the results support municipal decision-making[15].

MODERN METHODS OF DAMAGE ASSESSMENT

In this section, we examine the primary computer vision techniques applied to infrastructure damage assessment. Each method offers distinct advantages depending on the specific requirements of the assessment task and available data sources.

Classification models assign a global severity category to an entire image. Typical labels include no damage, minor, moderate, severe, and destroyed. Common architectures such as ResNet, EfficientNet, and MobileNet [1, 8] offer fast processing and low resource usage. However, these models lack spatial understanding of damage distribution within the image, limiting their utility for detailed damage mapping.

Object detection models identify and localize specific damage components such as cracks, façade failures, debris piles, and roof collapse. Modern detectors like YOLOv8, YOLO-NAS, Faster R-CNN, and DETR [5, 16]

provide bounding boxes and confidence scores for each detected element. While these models enable rapid localization of damaged areas within complex urban scenes, they do not provide precise geometric boundaries of the damaged regions.

Semantic segmentation provides pixel-level classification of damaged versus undamaged regions, which is essential for calculating exact damage area. Widely used architectures include U-Net, U-Net++ [3, 4, 9], DeepLabv3+, Mask R-CNN, and the recent Segment Anything Model (SAM). Segmentation forms the backbone of quantitative damage analysis by enabling precise measurement of affected surfaces and providing the foundational data for Damage Index calculation.

Change detection analyzes differences between pre-event and post-event images, making it particularly useful when baseline imagery exists from sources such as Google Street View or satellite archives. Common models include Siamese Networks, Transformer-based change detection architectures, and Temporal CNNs. This approach enables direct quantification of damage by comparing identical locations across time, eliminating ambiguity from pre-existing structural deterioration.

COMPUTER VISION TECHNIQUES

The evolution of deep learning architectures has significantly impacted damage assessment capabilities. Convolutional Neural Networks have dominated computer vision tasks for the past decade, establishing robust feature extraction methods for image analysis [3, 5]. However, Vision Transformers now provide superior contextual modeling through self-attention mechanisms and outperform CNNs on large-scale datasets [11]. Transformers can capture long-range dependencies in images, which proves valuable for understanding damage patterns across entire building facades or urban blocks.

Future damage assessment systems will increasingly rely on multimodal approaches that merge multiple data sources [17, 19]. These systems integrate visual imagery with metadata such as GPS coordinates and elevation data, GIS

context layers providing urban infrastructure information, and text descriptions from field reports. This multimodal fusion enables more robust and comprehensive damage characterization by leveraging complementary information sources that individually may be incomplete or ambiguous.

A critical component of standardized damage assessment is the Damage Index, a scalar metric representing normalized severity on a scale of 0–1 or 0–100 [15]. The DI incorporates multiple factors: percentage of structural surface damaged, presence and volume of debris, façade deformation magnitude, roof penetration area, and contextual GIS-based weighting that accounts for building importance, location, and structural type. The Damage Index enables cross-regional comparison and objective prioritization of reconstruction efforts, transforming qualitative visual assessments into quantitative decision-making metrics.

ROLE OF GIS IN DAMAGE MAPPING

Geographic Information Systems provide the spatial intelligence infrastructure needed for effective reconstruction planning. The integration of computer vision outputs with GIS platforms transforms raw damage detections into actionable operational intelligence.

Georeferencing aligns computer vision outputs with authoritative building footprints and cadastral data, ensuring accurate spatial localization of damage assessments. This process requires careful coordinate transformation and quality control to maintain positional accuracy across different data sources and coordinate systems.

Aggregation capabilities summarize Damage Index values at multiple spatial scales, from individual buildings to grid cells, neighborhoods, districts, and entire municipalities. This multi-scale analysis enables decision-makers to understand damage patterns at the appropriate level of detail for their specific planning needs.

Heatmap generation creates intuitive visual representations of damage density, allowing rapid identification of the most severely affected

areas for priority response and resource allocation [12, 13]. These

visualizations communicate complex spatial patterns effectively to stakeholders who may lack technical expertise in geospatial analysis.

Urban analytics functions leverage the integrated damage and GIS data to support advanced decision-making. Applications include population exposure estimation by overlaying damage maps with residential density data, road blockage assessment for emergency vehicle routing, proximity analysis identifying damage near critical facilities such as hospitals and schools, and multi-criteria prioritization of infrastructure repair based on structural importance, population served, and economic impact.

KEY CHALLENGES

Despite significant advances in AI-based damage mapping, several challenges must be addressed for successful implementation in Ukrainian cities.

Dataset scarcity remains a fundamental obstacle [8, 20]. Limited training data exists for Ukrainian architectural styles, particularly Soviet-era panel buildings with unique structural characteristics that respond differently to damage compared to Western construction types. Developing representative training datasets requires extensive field documentation and expert annotation.

Image source variability creates technical challenges for model generalization. Inputs range from high-altitude satellite imagery to low-altitude UAV footage and ground-level photographs, each exhibiting different resolutions, viewing angles, lighting conditions, and atmospheric effects. Models must maintain consistent performance across this heterogeneous input space.

Ambiguous damage signatures complicate automated classification. Weathering, shadows, architectural features, and pre-existing deterioration can be misclassified as disaster damage. Distinguishing recent damage from historical deterioration requires temporal context that may not always be available.

Coordinate system mismatches require careful geometric processing. Transforming between WGS84, UTM, and local coordinate systems while maintaining spatial accuracy demands robust geodetic procedures and quality control workflows.

Lack of standardized Damage Index methodologies across organizations and countries makes it difficult to compare assessments and integrate data from multiple sources. International collaboration is needed to establish consistent calculation frameworks and validation protocols.

The structural uniqueness of Soviet-era panel buildings presents a specialized challenge. These prefabricated concrete structures exhibit failure modes distinct from cast-in-place or masonry construction, requiring dedicated training data and potentially specialized model architectures.

PROPOSED PIPELINE

We propose an integrated processing pipeline that transforms raw imagery into actionable damage intelligence through sequential processing stages [6, 12].

The input stage accepts data from multiple sources: satellite imagery providing pre-event and post-event coverage at medium to high resolution, UAV imagery captured at low altitude delivering detailed building-level data with oblique viewing angles, ground photographs from first responders and civilians offering close-range damage documentation, and archived baseline imagery from Google Street View enabling temporal change detection.

The computer vision module processes these diverse inputs through multiple analysis pathways. Semantic segmentation generates pixel-level damage masks quantifying affected surface area. Object detection identifies and localizes specific damage features such as façade collapse, debris accumulation, and structural deformation. Classification assigns overall severity levels to entire structures or image regions. Change detection performs temporal comparison between pre-event and

post-event imagery to isolate damage from pre-existing conditions.

Damage Index calculation integrates outputs from the computer vision module with contextual information. Weighted area ratio scoring quantifies the proportion of structural surface exhibiting damage. Structural failure metrics assess the severity of detected damage features. GIS-based contextual factors adjust the base damage score based on building importance, population served, and criticality to urban infrastructure networks.

The GIS integration layer performs geospatial mapping to associate damage assessments with specific structures in the urban cadastre. Heatmap generation visualizes damage density at multiple spatial scales. Reconstruction priority zoning identifies areas requiring immediate intervention based on damage severity, population exposure, and infrastructure criticality.

VISUAL EXAMPLES OF URBAN DAMAGE

To illustrate the practical application of the proposed damage assessment pipeline, we present representative examples of infrastructure damage from Ukrainian cities affected by recent military operations.

Figure 1 presents a schematic representation of the complete damage assessment pipeline, showing the flow from multiple input sources through computer vision processing, Damage Index calculation, and final GIS integration stages.

Figure 2 demonstrates typical façade damage patterns observed in residential buildings in Kyiv. The image shows characteristic destruction including broken windows, partial wall collapse, and exposed reinforcement structures resulting from explosive impact. This type of damage is particularly common in multi-story panel buildings constructed during the Soviet era.

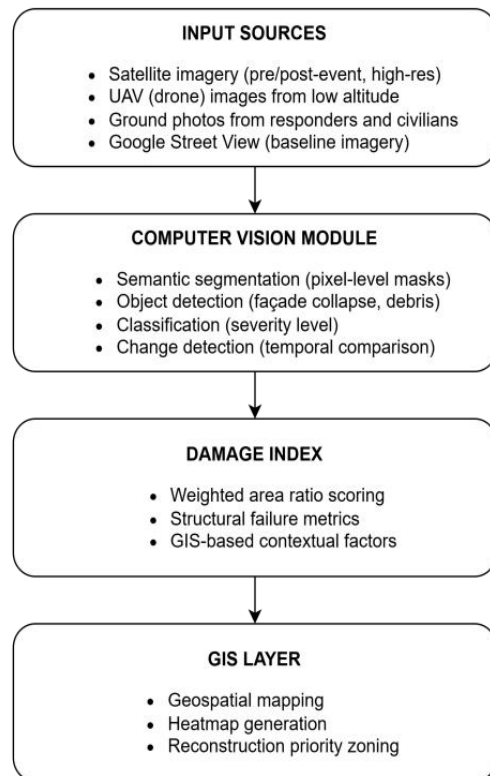


Fig. 1. AI-based damage assessment pipeline showing integration of multiple data sources



Fig. 2. Façade destruction in residential building, Kyiv (example of moderate to severe damage classification)

Figure 3 illustrates more severe structural failures documented in Kharkiv, including partial collapse of load-bearing panel walls, destroyed floor sections, and extensive

structural cracking. These damage patterns represent the most severe category in classification systems and require immediate structural stabilization interventions.



Fig. 3. Severe structural damage with partial collapse, Kharkiv (example of severe to destroyed classification)

These visual examples demonstrate the range of damage severity levels that the proposed AI-based assessment system must accurately classify and quantify. The variability in damage patterns, viewing angles, lighting conditions, and surrounding context illustrates the technical challenges discussed in the previous sections.

IMPLEMENTATION CONSIDERATIONS

Successful deployment of AI-based damage mapping systems requires addressing several practical considerations beyond algorithm development.

Computing infrastructure must support efficient processing of large image datasets. Cloud-based GPU resources can provide scalable computation for initial processing, while edge computing on UAV platforms enables real-time damage assessment during reconnaissance missions.

Model training requires diverse datasets representing the full range of Ukrainian

architectural styles and damage patterns. Transfer learning from existing damage datasets can accelerate development, but domain-specific fine-tuning remains essential for optimal performance.

Validation procedures must compare automated assessments against expert ground-truth data collected through traditional field surveys. Establishing quality metrics and acceptable error thresholds requires collaboration between computer scientists and structural engineering experts.

Integration with existing municipal GIS systems ensures compatibility with local planning workflows and data standards. APIs and data exchange formats must accommodate the technical constraints of legacy systems while enabling modern spatial analysis capabilities.

User interface design must present complex spatial analysis results clearly to decision-makers who may lack technical expertise in remote sensing or geospatial analysis. Interactive web-based dashboards with intuitive visualization and filtering capabilities facilitate effective use of damage intelligence.

CONCLUSIONS

AI-based approaches offer unprecedented opportunities to automate infrastructure damage assessment at city scale. When integrated with Geographic Information Systems, these technologies enable rapid, objective, and data-driven reconstruction planning that would be impossible through traditional manual inspection methods.

The current situation in Ukraine provides a unique real-world environment for developing and validating damage mapping methodologies that will have global applicability. The large scale of infrastructure damage, availability of multi-temporal imagery, and urgent need for effective reconstruction planning create conditions conducive to innovation in this field.

Key contributions of this paper include a comprehensive review of computer vision models applicable to damage assessment, expanded analysis of GIS integration workflows that transform raw detections into

actionable intelligence, identification of research gaps and challenges specific to Ukrainian architectural contexts, and proposal of a complete AI→Damage Index→GIS [12, 18] operational pipeline suitable for practical implementation.

Future research should focus on developing open-source training datasets documenting Ukrainian building types and damage patterns, standardizing Damage Index calculation methodologies to enable cross-regional comparison and data integration, validating automated assessment accuracy through systematic comparison with expert field surveys, and integrating multiple complementary data sources including satellite imagery, UAV reconnaissance, ground photography, and social media reports into unified operational systems supporting reconstruction planning and resource allocation.

REFERENCES

1. **Doshi J.** (2020). Damage Classification Using Deep CNNs. Conference Proceedings on Disaster Management.
2. **Xu Y., Wu L., Xie Z., Chen Z.** (2021). Building Damage Detection from Satellite Imagery Using Deep Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(8), 6347–6359.
3. **Ronneberger O., Fischer P., Brox T.** (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 234–241.
4. **He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R.** (2017). Mask R-CNN. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2961–2969.
5. **Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A.** (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 779–788.
6. **Li Z., Chen M., Wang X., Liu Y.** (2022). UAV-Based Urban Damage Assessment Framework for Post-Disaster Management. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 187, 142–158.
7. **NATO** (2020). Infrastructure Damage Assessment Standards for Crisis Management. NATO Standardization Office Technical Report.
8. **Azimi M., Eslamlou A. D., Pekcan G.** (2021). Deep Learning for Post-Disaster Damage Mapping from Satellite Imagery. *Engineering Structures*, 234, 111968.
9. **Bischke B., Helber P., Folz J., Borth D., Dengel A.** (2020). Multi-Task Learning for Segmentation of Building Footprints with Deep Neural Networks. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 1480–1489.
10. **Liu P., Zhang H., Eom K. B.** (2021). Active Deep Learning for Change Detection in Remote Sensing Images. *ACM Computing Surveys*, 54(7), 1–38.
11. **Lin Y., Zhao H., Wang Y., Zhang L.** (2022). Transformer Models for Structural Damage Analysis in Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 5214001.
12. **UNOSAT** (2022). Urban Destruction Mapping in Conflict Zones: Methodologies and Case Studies. United Nations Satellite Centre Damage Assessment Report.
13. **JRC EU Commission** (2019). Post-Disaster Damage Classification Standards and Protocols. Joint Research Centre Technical Guidelines.
14. **Google Research** (2020). Street View Imagery for Urban Infrastructure Analysis and Reconstruction Planning. Technical White Paper.
15. **Shi W., Goodchild M. F., Batty M., Kwan M., Zhang A.** (2021). Urban Informatics: GIS-Based Multi-Layer Risk Modelling. Springer, Berlin, 456.
16. **Zhang Z., Wang L., Liu Y., Chen X.** (2023). Automatic Debris Detection and Classification Using UAV Imagery and Deep Learning. *Remote Sensing*, 15(4), 987.
17. **Hsieh M., Lin C., Huang T., Wang S.** (2022). Multimodal Fusion Approaches for Infrastructure Damage Assessment. *IEEE Access*, 10, 45678–45690.
18. **Harvard HDRI Lab** (2021). Damage Index Normalization Models for Cross-Regional Assessment. Harvard Humanitarian Research Initiative Technical Report.
19. **Vetrivel A., Gerke M., Kerle N., Vosselman G.** (2018). Disaster Damage Detection Through Synergistic Use of Deep Learning and 3D Point Cloud Features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 140, 45–59.
20. **Khomenko I., Petrov A., Lysenko V.** (2023). Infrastructure Damage Patterns in Eastern Europe: A Comparative Case Study. *International Journal of Urban Studies*, 18(3), 234–251.

**Картографування пошкоджень міської
інфраструктури на основі штучного
інтелекту**

Костянтин Маринський

Анотація. Оцінка пошкоджень міської інфраструктури є критично важливою для поставарійного відновлення, розподілу ресурсів та планування міської стійкості. Ручні інспекції є повільними, суб'єктивними та небезпечними. Дане дослідження представляє розширений огляд підходів комп'ютерного зору (CV) та

геоінформаційних систем (ГІС) для автоматизованого виявлення пошкоджень з кількох джерел. Проаналізовано методи класифікації, детекції, сегментації та виявлення змін. Запропоновано розширений конвеєр ІІІ→Індекс Пошкоджень→ГІС. Розглянуто виклики, специфічні для українських міст. Стаття надає комплексну основу для впровадження автоматизованих систем картографування пошкоджень.

Ключові слова: комп'ютерний зір, ГІС, оцінка пошкоджень, сегментація, БПЛА-зображення, планування реконструкції.

Comparative analysis of contour detection algorithms in images in computer vision tasks. Part I

Dmytro Mishchuk¹, Yevhen Mishchuk², Dmytro Korzhevyn³

^{1,2}Kyiv National University of Construction and Architecture,
31 Air Force Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine,

³Cisco Talos Intelligence,
8135 Maple Lawn Blvd, Fulton, MD 20759, USA

¹mischuk.do@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>,

²mischuk.ieo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>,

³dkorzhev@cisco.com, <https://orcid.org/0009-0002-1916-5019>

Received: 12.11.2025, accepted: 08.12.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1208>

Abstract. Identifying contours in images is a fundamental task in computer vision, underpinning many modern technologies. Their accurate detection enables the solution of a wide range of practical problems, including segmentation and object recognition, 3D reconstruction, medical diagnostics, and autonomous control of systems.

In the field of computer vision, significant progress has been made in developing image processing algorithms; however, many unsolved problems remain. The tasks of improving the speed of solving existing algorithms and developing algorithms for working with limited computational memory resources remain relevant.

This paper presents a description and analysis of several well-known image processing algorithms for detecting contours in an image.

It is known that an image in computer systems is a set of pixels of a given brightness and color. Such a representation can be represented in the form of matrices, where each of its elements is a pixel, and the position is the coordinates of each pixel. Thus, image processing from the position of mathematics is working with matrices and sets. The quality of the processing algorithm will depend on the chosen method of working with matrices.

Neural networks, although not a new approach, have gained widespread popularity relatively recently, mainly due to the development of convolutional neural networks, which specialize in processing photo and video data. In addition, the use of recurrent neural networks allows you to search for the optimal architecture for neural network systems. Different models have been adapted to specific constraints, such as the size of the model itself, computational resources, or ensuring the required accuracy.

Alternative approaches to neural networks are algorithms based on detectors and descriptors. In essence, these are algorithms that allow you to



Dmytro Mishchuk
Ph.D., department of construction machinery



Yevhen Mishchuk
Ph.D., department of machinery and equipment of technological processes



Dmytro Korzhevyn
Cisco

compare images based on some basic features. For example, to understand that two different photos show the same object, the computer does not compare every pixel, but looks for "special" places and describes them mathematically, which significantly speeds up image processing, but can lead to errors.

Keywords: Roberts operator, Prewitt operator, Laplacian, erosion, blurring, morphological processes, dilation, normalization.

INTRODUCTION

Contours are boundaries between objects or areas with different visual characteristics.

Today visual information processing is becoming increasingly automated; and contour detection methods are widely used in various industries. For example, in medicine, such image processing algorithms are used to analyze medical images (X-rays, MRI, CT scans), which allows doctors to diagnose diseases faster and more accurately. In the field of autonomous vehicles, contours help guidance systems detect obstacles, pedestrians, and other objects on the road. In remote sensing of the Earth, contour detection is used to process satellite images, which is important for monitoring environmental changes, urban planning, and resource management.

Thus, the development and improvement of contour detection methods is a relevant area of research, since the quality and reliability of many automated systems depend on their effectiveness.

PURPOSE AND OBJECTIVES

The main goal of this work is to analyze and compare classical and modern methods of contour detection.

The objectives of the work were to identify the advantages and disadvantages of each approach and assess the applicability of the methods depending on the type of images and tasks.

PRESENTATION OF THE MAIN MATERIAL

Image edge detection methods can be classified according to the approach used to detect the boundaries between objects. The main known detection categories include:

1. *Gradient methods* - These methods are based on the analysis of the intensity changes of pixels in an image. Contours are defined as areas with a high brightness gradient. The most common algorithms include the Sobel, Prewitt, Roberts operators, and the Canny operator, which combines noise filtering, gradient calculation, and hysteresis thresholding to obtain thin and continuous contours.
2. *Laplacian-based methods*. The Laplacian is a second-order differential operator that

detects areas of rapid intensity change. This method is sensitive to noise, so it is often used in conjunction with pre-filtering (e.g., Gaussian blur). Laplacian-based methods allow for the detection of contours of varying thickness, but require additional processing to eliminate false detections.

3. *Methods based on morphological analysis*. Morphological processes (erosion, dilation, opening, closing) are used to extract contours by processing binary or gray images. These methods are especially effective for processing images with clear boundaries between objects, for example, in the tasks of texture segmentation or analysis of microscopic images.
4. *Methods based on active contours (Snakes, Level Set)* - these are methods that use deformed curves that adapt to the boundaries of objects under the influence of internal and external forces. Active contour methods allow you to obtain smooth and continuous contours, but require an initial approximation and are computationally more complex compared to gradient methods.
5. *Machine learning and deep learning methods* - these are modern approaches to edge detection that are built on the basis of fuzzy neural network logic, in particular convolutional neural networks (CNN) and U-Net-type architectures. These methods allow you to automatically learn to detect edges based on large data sets, which significantly increases accuracy and noise resistance. Examples: HED (Holistically-Nested Edge Detection) algorithms, RCF (Rich Convolutional Features).

The Roberts operator is one of the simplest methods for determining contours. It calculates the gradient using two 2×2 matrices (convolution kernels) that approximate derivatives along the diagonals:

$$\begin{aligned} G_x &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \\ G_y &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

Algorithm for applying the Roberts operator. Suppose that the input image is represented as a two-dimensional matrix of pixels I with size $M \times N$, where each pixel has an intensity from 0 to 255. At the output, this algorithm returns a new image matrix G with selected contours of size $M \times N$.

To implement this algorithm, you first need to create an empty matrix G with size $M \times N$ and specify Roberts kernels – matrices of size 2×2 (1). To process the original image, it is necessary for each pixel $I_{(i, j)}$ (where $1 < i < (M-1)$, $1 < j < (N-1)$) calculate the gradient value using the next formula:

$$g_x = I_{(i, j)} \cdot G_{x(0, 0)} + I_{(i, j+1)} \cdot G_{x(0, 1)} + I_{(i+1, j)} \cdot G_{x(1, 0)} + I_{(i+1, j+1)} \cdot G_{x(1, 1)} \quad (2)$$

$$g_y = I_{(i, j)} \cdot G_{y(0, 0)} + I_{(i, j+1)} \cdot G_{y(0, 1)} + I_{(i+1, j)} \cdot G_{y(1, 0)} + I_{(i+1, j+1)} \cdot G_{y(1, 1)} \quad (3)$$

Next, the gradient modulus is calculated, which will reflect the pixel value in the new image:

$$G_{(i,j)} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (4)$$

To visualize the gradient values, they need to be normalized. To do this, you need to find the minimum G_{\min} and maximum G_{\max} values in the gradient matrix and give each value $G_{i,j}$ to the range $[0, 255]$ according to the following formula:

$$G_{norm(i,j)} = round \left[255 \cdot \frac{G_{(i,j)} - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \right], \quad (5)$$

where $G_{norm(i,j)}$ - normalized pixel brightness value.

If $G_{norm(i,j)} < 0$ then $G_{norm(i,j)} = 0$, if $G_{norm(i,j)} > 255$ then $G_{norm(i,j)} = 255$, if $G_{\min} = G_{\max}$ then $G_{norm(i,j)} = 0$.

The advantages of this method of image processing are its simplicity of implementation, but for large image sizes it requires a large number of calculations and sorting of the gradient array. This method is also sensitive to noise and can detect contours only along

diagonals, which can lead to missing some boundaries. It is mainly used for fast processing of small images or as a preliminary stage in more complex algorithms.

The Prewitt operator uses two kernel matrices of size 3×3 to calculate the horizontal gradient (G_x) and vertical (G_y):

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Algorithm for applying the Prewitt operator. For the image I in size $M \times N$ an empty matrix G created with size $M \times N$. Next needs to specify the Prewitt kernels (6).

For each pixel $I_{(i, j)}$, where $1 < i < M-1$ and $1 < j < N-1$, need to calculate the gradient values:

$$g_x = I_{(i-1, j-1)} \cdot G_{x(0, 0)} + I_{(i-1, j)} \cdot G_{x(0, 1)} + I_{(i-1, j+1)} \cdot G_{x(0, 2)} + I_{(i, j-1)} \cdot G_{x(1, 0)} + I_{(i, j)} \cdot G_{x(1, 1)} + I_{(i, j+1)} \cdot G_{x(1, 2)} + I_{(i+1, j-1)} \cdot G_{x(2, 0)} + I_{(i+1, j)} \cdot G_{x(2, 1)} + I_{(i+1, j+1)} \cdot G_{x(2, 2)}; \quad (7)$$

$$g_y = I_{(i-1, j-1)} \cdot G_{y(0, 0)} + I_{(i-1, j)} \cdot G_{y(0, 1)} + I_{(i-1, j+1)} \cdot G_{y(0, 2)} + I_{(i, j-1)} \cdot G_{y(1, 0)} + I_{(i, j)} \cdot G_{y(1, 1)} + I_{(i, j+1)} \cdot G_{y(1, 2)} + I_{(i+1, j-1)} \cdot G_{y(2, 0)} + I_{(i+1, j)} \cdot G_{y(2, 1)} + I_{(i+1, j+1)} \cdot G_{y(2, 2)}. \quad (8)$$

This algorithm ignores the extreme rows and columns, since the kernel is 3×3 and does not fit on the edges. Next, the gradient modulus is determined using a similar formula (4), and normalization is performed.

This algorithm detects contours better than the Roberts algorithm, but is also sensitive to noise - small objects or individual pixels. It is often used for processing medium-quality images, where speed and simplicity are important.

The Sobel operator is the most common of these three. It also uses two 3×3 cores, but with additional weighting for the center row/column, which reduces sensitivity to noise:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

The gradient for the Sobel operator is calculated similarly to that for the Prewitt operator. This method can suppress noise better than Prewitt and Roberts, which allows you to more accurately determine the direction of the contour. The disadvantages of this method of contour determination are that this algorithm can produce thick contours and requires additional processing for fine boundary selection. The Sobel operator using in computer vision systems, medical imaging, and satellite image processing.

The Laplacian calculates the change in the intensity of the image brightness at each point, indicating the boundaries of objects where the brightness changes sharply and is defined as the sum of the second derivatives in the coordinates x and y :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}, \quad (10)$$

where: I — pixel intensity.

Brightness function I depends on the coordinates of the pixel in the image – x and y , that is $I(x, y)$ – is the brightness of the pixel at position (x, y) . The derivative shows how quickly the brightness changes when moving from one pixel to the next. Since it is not possible to calculate the derivative directly in the image, the following approximation is used:
- the first derivative is approximated as the difference in brightness of neighboring pixels:

$$\frac{\partial I}{\partial x} \approx I_{(x+1,y)} - I_{(x,y)}; \quad (11)$$

- second derivative – difference of first derivatives:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \approx (I_{(x+1,y)} - I_{(x,y)}) - (I_{(x,y)} - I_{(x-1,y)}). \quad (12)$$

In practice, for discrete images, instead of searching for gradients, Laplacian approximation is used using a convolution kernel, for example:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Algorithm for applying the Laplacian. At the beginning of processing, the original image must be converted to grayscale (if it is color) and transformed into a matrix of pixels I with normalization to values from the range $[0, 1]$ or $[0, 255]$. Next, a new matrix of the same size is created, where each pixel will be the result of applying the Laplacian to the corresponding pixel of the original image. To do this, a kernel (kernel convolution) is applied to each pixel of the original image (except for the boundaries) so that the center of the kernel coincides with the current pixel. Next, the new pixel value is calculated as the sum of the products of the image pixel values and the corresponding kernel values:

$$\begin{aligned} \text{new_pixel}_{(x,y)} = & I_{(x-1,y-1)} \cdot K[0,0] + \\ & + I_{(x-1,y)} \cdot K[0,1] + I_{(x-1,y+1)} \cdot K[0,2] + \\ & + I_{(x,y-1)} \cdot K[1,0] + I_{(x,y)} \cdot K[1,1] + \\ & + I_{(x,y+1)} \cdot K[1,2] + I_{(x+1,y-1)} \cdot K[2,0] + \\ & + I_{(x+1,y)} \cdot K[2,1] + I_{(x+1,y+1)} \cdot K[2,2]. \end{aligned} \quad (14)$$

Pixels at the image borders can be ignored (left black), reflected, or border extended.

After convolution with the Laplacian kernel, pixel values can be both positive and negative, so normalization to the range $[0, 255]$ is applied for visualization according to the algorithm using the formula (5).

Sometimes thresholding is also applied after normalization to retain only the strongest contours:

```
if abs(normalized_pixel) > threshold:
    edge_pixel = 255
else:
    edge_pixel = 0
```

This approach allows for contour detection because the Laplacian responds to abrupt changes in intensity.

The Kenny algorithm is a multi-stage algorithm that combines high accuracy in detecting significant edges with minimizing false positives. It is one of the most effective methods for detecting contours in computer vision. The Kenny algorithm is not limited to calculating the smoothed gradient of the image. Only the points of maximum gradient of the image remain in the contour, and the maxima near the boundary are removed. His method also uses information about the direction of change of the image contour boundary in order to remove noise near the boundary and not break the contour near local gradient maxima. Further, weak boundaries are removed using two thresholding processes. Fragments of the contour boundaries are processed as a single whole fragment. If the gradient value anywhere on the processed fragment exceeds the upper threshold, then such a fragment remains valid even in those places where the gradient value is lower than this threshold value, until the gradient value becomes lower than the lower threshold. If there is no point with a value greater than the upper threshold on the entire fragment, then such a fragment is deleted. This approach allows you to reduce the number of breaks in the original boundaries. The use of noise reduction in the Kenny algorithm increases the stability of the results, but increases the computational costs and can lead to distortion and loss of clarity of boundaries. For example, this algorithm rounds the corners of objects and destroys the boundaries at the connection points.

The algorithm for applying the Kenny method consists of sequentially executing the following image processing cycles.

1. Gaussian smoothing, which is essentially a blurring of the original image to remove noise (small scattered pixels). A two-dimensional Gaussian filter is used - a matrix (kernel) that processes the pixels of the original image. Each pixel of the kernel is a weighted average of its neighbors, and the weights are determined by the Gaussian function:

$$G_{(x,y)} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (15)$$

where σ – standard deviation, which determines the degree of “blur” (the larger this value, the stronger the blur and the better the noise suppression); x, y – pixel coordinates relative to the center of the filter kernel.

For a blur kernel of size 3×3 and $\sigma = 1$ we define the components of the matrix:

$$G_{(0,0)} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} 2,71 \frac{0^2+0^2}{2 \cdot 1^2} = 0,159$$

$$G_{(-1,0)} = G_{(0,-1)} = G_{(0,1)} = G_{(1,0)} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} 2,71 \frac{1^2+0^2}{2 \cdot 1^2} = 0,262$$

$$G_{(-1,1)} = G_{(1,-1)} = G_{(-1,-1)} = G_{(1,1)} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} 2,71 \frac{1^2+1^2}{2 \cdot 1^2} = 0,432$$

Then the blur filter kernel will be like this:

$$g = \begin{bmatrix} 0,432 & 0,262 & 0,432 \\ 0,262 & 0,159 & 0,262 \\ 0,432 & 0,262 & 0,432 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

In practical applications, a simplified Gaussian formula is often used for each pixel:

$$GS_{(x,y)} = e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \quad (17)$$

In this case, the resulting kernel matrix is normalized. To do this, the sum of all elements of this matrix is determined, and each of its elements is divided by this sum. This allows you not change the brightness of the original image. To calculate the new brightness for a specific pixel, you need to superimpose the convolution kernel on the original image. To do this, superimpose the center of the convolution matrix on the selected pixel (usually starting from the upper left corner). Next, the brightness value of each neighboring pixel must be

multiplied by the corresponding coefficient of the kernel matrix, which is "underneath it". The resulting values added, and the result will be the new (smoothed) pixel value:

$$p_{new} = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 I_{(x+i,y+j)} \cdot g_{(i,j)}, \quad (18)$$

where p_{new} is pixel intensity value of the new image; $I_{(x+i,y+j)}$ the pixel intensity of the original image; $g_{(i,j)}$ is blur kernel value.

The resulting total value is written to a new image array at the same location as the central kernel pixel. Then the kernel matrix is shifted one pixel to the right in the original image, and the procedure is repeated. When the row ends, the matrix moves to the next row. To process the edges of the image, when the center of the matrix is at the outermost pixel of the photo, part of the kernel protrudes beyond the image. To solve this problem, either addition or ignoring is used. When adding, a frame of black pixels is added, or the outermost pixels are duplicated. Ignoring – the outermost strip with a width equal to the kernel radius is not processed. After this step, an image will be obtained where small details and noise are absent, and important contours remain, but slightly blurred.

2. Applying a gradient (usually Sobel), which allows you to determine the intensity (strength) of the gradient and its direction.

3. Non-Maximum Suppression – fine-tuning of boundaries. The essence of this stage is to "thin out" the edges. Only those pixels that are local intensity maxima in the gradient direction are left. The gradient direction (which can be at any angle from 0 to 360°) is rounded to one of four main directions: 0° (horizontal), 45° (diagonal), 90° (vertical), 135° (diagonal). For each pixel, it is compared with two neighboring pixels in the same direction. If the gradient is directed horizontally (0°), the current pixel is compared to the pixels to the left and right. If the current pixel has the highest intensity among these three, then it is left. If not, set its brightness to 0.

4. Double threshold filtering, which allows filtering out pixels that have a high gradient due to noise, rather than the real boundary of the object. The algorithm uses two thresholds: lower and upper. All pixels are divided into three types:

- strong – gradient above the upper threshold.
- weak – gradient between thresholds. These are "candidates" in the limit.
- irrelevant – gradient below the lower threshold. These pixels are removed (turned black).

5. Hysteresis edge tracing is the final step, where a weak pixel is recognized as part of a true boundary and remains if it touches a strong pixel. If a weak pixel stands alone and there are no strong pixels around it, then such a pixel is considered noise and is removed. Before using such a detector, the original image is usually converted to grayscale to reduce computational costs. This step is typical for many image processing methods.

Thus, first-order methods (gradient methods) determine contours by calculating the first derivative (change in brightness). To do this, small matrices are used that "slide" over the image. The Roberts operator calculates the difference between diagonal pixels, has a kernel with a matrix 2×2, very fast and finds sharp corners well. Disadvantage is sensitive to noise and intermittent contours. The Prewitt operator uses a mask to calculate the gradient horizontally and vertically. The size of the mask matrix 3×3, suppresses noise better than Roberts due to larger analysis area, but creates "blurred" and thick contours and does not take into account the central weight of the pixel. The Sobel operator is an improved version of the Prewitt operator. In the matrix, the central pixels have a greater weight, the kernel has a size 3×3, quickly solves simple problems, smooths noise well and gives a clear gradient direction. The disadvantage is that it leaves thick outlines.

Second-order operators (Laplacian) look for points where the first derivative has an extreme (crossing through zero of the second derivative). Responds equally to contours in all directions, finds very fine boundaries, but is extremely sensitive to noise. Even noise invisible to the eye can turn the result into a

"white noise". Usually used together with blurring (Laplacian of Gaussian).

Kenny algorithm is a multi-step method that includes a whole process, namely Gaussian filtering, Sobel filtering, non-maximal suppression and hysteresis. This algorithm has the best accuracy compared to the previous ones, gives thin, continuous lines. The disadvantage is that it is computationally complex (slower than Sobel). Requires manual adjustment of two thresholds.

In Table 1 shows a comparison of indicators for different image processing operators.

Table 1. Operator comparison

Operator	Core size	Sensitivity to noise	Detection accuracy	Speed
Roberts	2×2	High	Low	High
Prewitt	3×3	Wednesday	Medium	Medium
Sobel	3×3	Low	High	Medium
Kenny	3×3	Low	High	Low
Laplacian	3×3	High	High	Medium

Morphological analysis is a set of image processing methods based on set theory and topology, which allows you to change image parameters and subsequently accelerate processing for contour detection. The main functions of morphological analysis are erosion, dilation, opening and closing. Morphological analysis functions allow you to modify the shape of objects in an image, highlighting or suppressing certain structures, for example, blurring or enhancing the boundaries of foreground pixel regions. Structural elements of modifiers can be small matrices (usually 3×3 or 5×5), which define the shape of operations, in particular, the most commonly used are a rectangle and a circle (approximated on a discrete grid). For the rectangular modifier 3×3, the kernel will be this matrix:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{19}$$

The principle of the erosion modifier is to reduce the size of objects in an image by blurring their boundaries. The erosion operator takes two pieces of data as input. The first is the image to be eroded, the second is a structural element (the erosion kernel) that determines the exact effect of erosion on the input image. Typically, erosion is best applied to binary images, but there are versions that work with grayscale images.

Erosion for a binary image consists in superimposing an erosion kernel on a part of the pixel array of the output image that is equal in size to the pixel array of the mask. Provided that all the pixels of the mask coincide with the pixels of the output image, then the pixel of the output image that corresponds to the central position of the mask remains unchanged, otherwise such a pixel is converted to the background.

Let A be the original image represented as a function

$$A:Z^2 \rightarrow V, \tag{20}$$

where: V – a set of pixel values (e.g., $\{0,1\}$ for binary images or $[0,255]$ for grayscale).

If B is a structural element that can also be represented as a matrix B :

$$Z^2 \rightarrow \{0,1\}, \tag{21}$$

where: B defines the shape of the neighborhood (e.g., a 3×3 rectangle), then for binary images the erosion is defined as:

$$A \ominus B(x) = \min_{b \in B} A(x+b) = \min \begin{pmatrix} A_{(i-1,j-1)} & A_{(i-1,j)} & A_{(i-1,j+1)} \\ A_{(i,j-1)} & A_{(i,j)} & A_{(i,j+1)} \\ A_{(i+1,j-1)} & A_{(i+1,j)} & A_{(i+1,j+1)} \end{pmatrix}, \tag{22}$$

where: \ominus – erosion operator, x – pixel coordinates, b – coordinates of non-zero elements of a structural element B .

On Fig. 1 shows a graphical algorithm for performing erosion for a binary image. Such an algorithm has the following description. For each pixel $A_{(i,j)}$ checks whether all pixels that

overlap the mask 3×3 equal 1. If at least one pixel in the neighborhood equals 0, then the result for this pixel is -0 . Only the central pixels of the object around which all pixels are the same and non-zero brightness remain 1.

The effect of applying erosion: removes small objects (noise); separates stuck objects; reduces the size of objects.

The 3×3 square is probably the most common structural element used in erosion operations, but others can be used. A larger structural element creates a more pronounced erosion effect, although very similar effects can usually be achieved by repeated erosions using a smaller structural element of similar shape. With larger structural elements, it is quite common to use a structural element that is roughly disc-shaped, as opposed to a square.

Erosions can be made directional by using less symmetrical structuring elements. For example, a structuring element that is 10 pixels wide and 1 pixel tall will erode only in the horizontal direction. Similarly, a 3×3 square structuring element with its origin in the middle of the top row rather than in the center will erode the bottom of the region more than the top.

Erosion of gray tones using a flat disk-shaped structural element usually darkens the

image. Light areas surrounded by dark areas decrease in size, and dark areas surrounded by light areas increase in size. Small bright spots in the image will disappear as they fade to their surrounding intensity value, while small dark spots will become larger. The effect is most noticeable in areas of the image where the intensity changes rapidly, while areas of fairly uniform intensity will remain more or less unchanged except at their edges. Flat disk-shaped erosion cores cause small peaks in the image to disappear and valleys to widen.

REFERENCES

1. **Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A.** (2015). You only look once: Unified, real-time object detection, [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1506.02640>.
2. **Melin P., Gonzalez C., Castro J., Mendoza O., Castillo O.** (2014). "Edge-Detection Method for Image Processing Based on Generalized Type-2 Fuzzy Logic," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v. 22, 1515—1525.
3. **Tymchyshyn R., Volkov O., Gospodarchuk O., Bogachuk Yu.** (2018). Modern approaches to computer vision. Control Systems and Computers, No.6, 47-73. <https://doi.org/10.15407/usim.2018.06.046>.

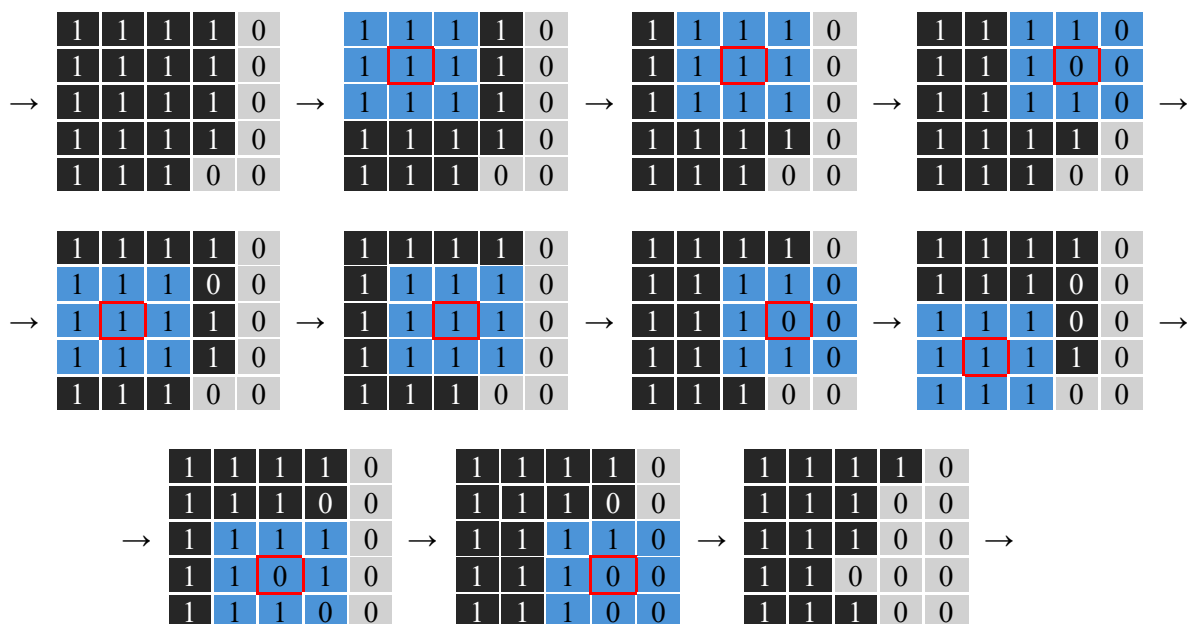


Fig. 1. Example of applying erosion the binary image

4. **Suriyababu V.K., Vuik C., Möller M.** (2023). Towards a High Quality Shrink Wrap Mesh Generation Algorithm Using Mathematical Morphology. *Computer-Aided Design*, Vol. 164, 103608, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103608>.
5. **Courteaux M., Ramlot B., Lambert P., Van Wallendael G.** (2025). Lightweight Implicit Approximation of the Minkowski Sum of an N-Dimensional Ellipsoid and Hyperrectangle. *Mathematics*, 13(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/math13081326>.
6. **Bernholt T., Eisenbrand F., Hofmeister T.** (2009). Constrained Minkowski sums: A geometric framework for solving interval problems in computational biology efficiently. *Discret. Comput. Geom.*, 42, 22–36.
7. **Govindaraju N. K., Lin M. C., Manocha D.** (2004). Fast and reliable collision culling using graphics hardware. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, New York, NY, USA, 10–12 November, VRST'04, 2–9.
8. **Agarwal P. K., Flato E., Halperin D.** (2002). Polygon decomposition for efficient construction of Minkowski sums. *Comput. Geom.*, 21, 39–61.
9. **Courteaux M., Maren H., Ramlot B., Lambert P., Van Wallendael, G.** (2024). Dimensionality Reduction for the Real-Time Light-Field View Synthesis of Kernel-Based Models. *Electronics*, 13(20), 4062. <https://doi.org/10.3390/electronics13204062/>
10. **Zerman E., Ozcinar C., Gao P., Smolic A.** (2020). Textured Mesh vs Coloured Point Cloud: A Subjective Study for Volumetric Video Compression. In *Proceedings of the 2020 12th International Conference on Quality of Multimedia Experience, QoMEX, Athlone, Ireland, 26–28 May 2020*.

Порівняльний аналіз алгоритмів визначення контурів на зображеннях в задачах комп'ютерного зору. Частина 1

Дмитро Міщук¹, Євген Міщук²,
Дмитро Коржевін³

^{1,2}Київський національний університет
будівництва і архітектури,
³Cisco Talos Intelligence

Анотація. Визначення контурів на зображеннях є однією з фундаментальних задач

комп'ютерного зору, яка лежить в основі багатьох сучасних технологій. Їх точне виявлення дозволяє розв'язувати широкий спектр практичних завдань: від сегментації та розпізнавання об'єктів до 3D-реконструкції, медичної діагностики та автономного керування системами.

В галузі комп'ютерного зору досягнуто значного прогресу в створенні алгоритмів обробки зображень, проте залишається багато нерозв'язаних задач. Актуальними залишаються задачі з покращення швидкодії розв'язання існуючих алгоритмів, розробки алгоритмів для роботи з обмеженими обчислювальними ресурсами пам'яті.

В даній роботі пропонується опис і аналіз деяких відомих алгоритмів обробки зображень з визначення контурів на зображенні. Як відомо зображення, в комп'ютерних системах це набір пікселів заданої яскравості та кольору. Таке представлення можна відображати у виді матриць, де кожен її елемент – це піксель, а положення – це координати кожного пікселя. Таким чином обробка зображення з позиції математики – це робота з матрицями та множинами. Якість алгоритму обробки буде залежати від обраної методики роботи з матрицями.

Нейронні мережі, хоча і не є новим підходом, проте здобули широку популярність відносно нещодавно, головним чином завдяки розвитку згорткових нейронних мереж, які спеціалізуються на обробці фото- та відеоданих. Крім того, використання рекурентних нейронних мереж дозволяє здійснювати пошук оптимальної архітектури для нейромережових систем. Різні моделі були адаптовані до специфічних обмежень, таких як розмір самої моделі, обчислювальні ресурси чи забезпечення необхідної точності.

Альтернативними підходами до нейронної мережі є алгоритми на основі детекторів та дескрипторів. По суті це алгоритми, які дозволяють порівняти зображення на основі деяких базових ознак. Наприклад, щоб зрозуміти, що на двох різних фото зображений один і той самий об'єкт, комп'ютер не порівнює кожен піксель, а шукає «особливі» місця і описує їх математично, що значно пришвидшує обробку зображення, проте може давати похибки.

Ключові слова: оператор Робертса, оператор Превітта, Лапласіан, ерозія, розмиття, морфологічні процеси, дилатація, нормалізація.

Ensuring survivability of complex super-critical systems based on hierarchical abstraction model and adaptive reconfiguration in post-critical state

*Dmyrto Humennyi*¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitryanykh Sil avenue, 31, Kyiv, 03037

¹ apollo.d.g@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6736-0543>

Received: 04.11.2025, accepted: 08.12.2025
<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1209>

Abstract. This paper presents a novel concept for ensuring survivability of complex super-critical systems in post-critical state based on a four-level abstraction hierarchy and adaptive reconfiguration mechanism. A mathematical model of the survivability function $S(t)$ is developed, integrating resource states, function activities, and their weight coefficients. An algorithm for optimal system configuration selection during component degradation is proposed, maximizing survivability under minimum functionality constraints. Practical implementation of rapid reconfiguration mechanisms based on Post-Build Configuration architecture for automotive ECUs in accordance with ISO 26262 is described.

Keywords: system survivability, post-critical state, reconfiguration, graceful degradation, abstraction hierarchy, ISO 26262, ASIL, Lyapunov function, super-critical systems.

INTRODUCTION

Modern cyber-physical systems, particularly automotive electronic control systems, are characterized by high levels of complexity and criticality as well as strict functional safety requirements imposed on their design and operation [1, 4]. The problem of ensuring system operation after partial failures — in the so-called post-critical state, when some components have failed or operate with faults, but the system must continue to perform critical functions — is of particular relevance [5, 8, 10].

The traditional approach to functional safety, based on ISO 26262, provides for system transition to a Safe State upon failure detection [1]. However, for many applications, particularly autonomous driving systems,



Dmyrto Humennyi
Ph.D., Engineering Manager
at N-iX, Associate Professor
of the Department of
Cybersecurity and Computer
Engineering

complete system shutdown may be more dangerous than continued operation with limited functionality. This requires new approaches to designing systems capable of Graceful Degradation and rapid reconfiguration.

The purpose of this research is to develop theoretical foundations and practical methods for ensuring survivability of complex systems in post-critical state based on a hierarchical abstraction model that enables rapid system reconfiguration while maintaining maximum possible functionality.

MATHEMATICAL MODEL OF SYSTEM SURVIVABILITY

2.1. Resource State Model

Let the system consist of a set of resources $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, where each resource can be in one of three states: H (Healthy), D (Degraded), F (Failed). The state of the i -th resource at time t is denoted as $x_i(t) \in \{H, D, F\}$.

For each resource, an operability coefficient $\rho_i(t) \in [0, 1]$ is introduced, characterizing its ability to perform functions:

$$\rho_i(t) = \rho_{oi} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t_{\text{degraded}}), \quad (1)$$

where ρ_{oi} is the initial operability coefficient (1.0 for H, 0.3-0.7 for D, 0 for F), λ_i is the degradation intensity, t_{degraded} is the time spent in degraded state. The dynamics of transitions between states is described by a Markov process with intensity matrix Q [5, 10].

2.2. System Survivability Function

The system implements a set of functions $F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$, each having a weight $w_j \in [0, 1]$ reflecting its importance for mission execution. The system survivability function is defined as:

$$S(t) = \sum_j w_j \cdot f_j(\rho_1, \dots, \rho_n) \cdot \delta_j(t), \quad (2)$$

where $\delta_j(t) \in \{0, 1\}$ is the activation indicator for function F_j (determined by current configuration), $f_j(\rho)$ is the dependency function of the j -th function on resource operability coefficients:

$$f_j(\rho) = \prod_{i \in R_j} \rho_i \cdot \prod_{k \in O_j} \max(\rho_k, \rho_{\text{backup}}), \quad (3)$$

where R_j is the set of required resources for

function F_j , O_j is the set of optional (redundant) resources, ρ_{backup} is the backup channel operability coefficient.

2.3. Mission Objective Function

The level of mission execution by the system is determined by the objective function:

$$\Phi(t) = \sum_i w_i \cdot \varphi_i(t), \text{ where } \varphi_i \in \{0, 1\}, \quad (4)$$

The system transitions between operating modes (NOMINAL \rightarrow DEGRADED \rightarrow LIMP_HOME \rightarrow SAFE_STOP) depending on the ratio of $\Phi(t)$ to threshold values $\Phi_{\text{threshold}}(\text{mode})$. The survivability management task consists of maximizing $S(t)$ subject to constraints $\Phi(t) \geq \Phi_{\text{min}}(\text{mode})$.

HIERARCHICAL ABSTRACTION MODEL FOR RECONFIGURATION

To enable rapid system reconfiguration while maintaining its integrity, a four-level abstraction hierarchy is proposed (Fig. 1), where each level encapsulates implementation details of lower levels and provides interfaces for management by higher levels.

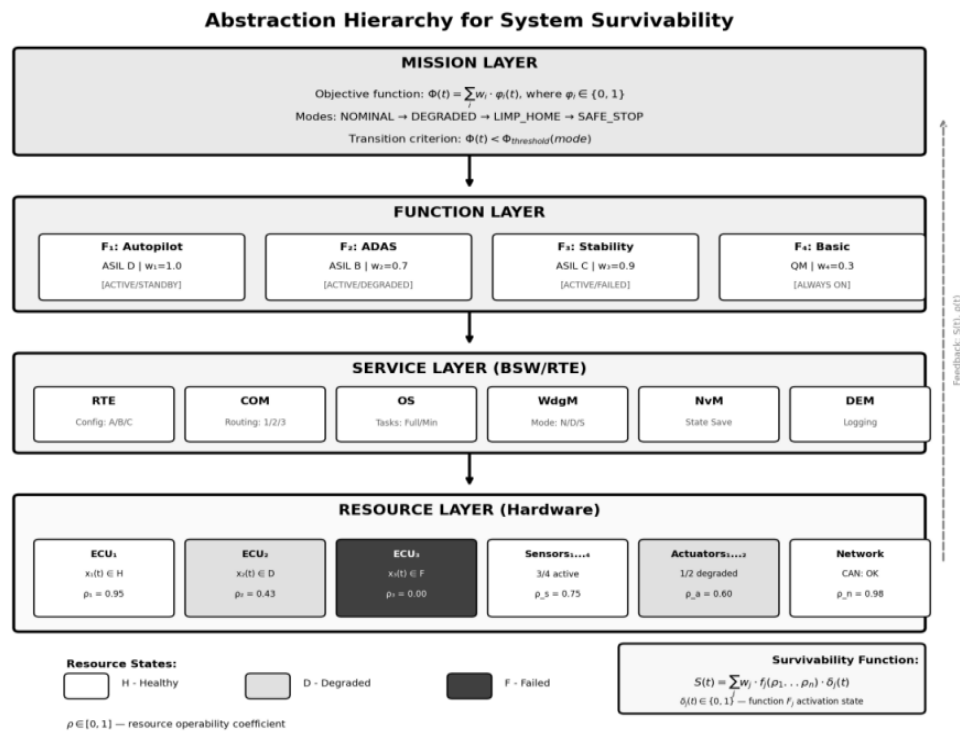


Fig. 1. Abstraction hierarchy for ensuring system survivability

3.1. Mission Layer

The highest abstraction level defines global system objectives and permissible degradation modes. At this level, decisions are made about transitions between NOMINAL, DEGRADED, LIMP_HOME, and SAFE_STOP modes based on the objective function value $\Phi(t)$. Transition criterion: $\Phi(t) < \Phi_threshold(current_mode) \rightarrow$ transition to lower mode.

3.2. Function Layer

This level defines the set of system functions and their states (ACTIVE, STANDBY, DEGRADED, DISABLED). Each function is characterized by weight w_j , ASIL level, and resource dependencies. Reconfiguration at this level consists of changing the set of active functions $\delta_j(t)$ to maximize $S(t)$ for a given mission mode.

3.3. Service Layer

The Basic Software (BSW) and Runtime Environment (RTE) level with multiple configuration support. Implemented through the Post-Build Configuration

mechanism, allowing switching of COM routing tables, OS settings, WdgM parameters without recompilation. Each service supports several predefined configurations (Config A/B/C).

3.4. Resource Layer

The lowest abstraction level, responsible for monitoring the state of physical components (ECU, sensors, actuators, networks) and providing information about operability coefficients $\rho_i(t)$ to higher levels. Feedback from this level is the basis for reconfiguration decisions.

ADAPTIVE RECONFIGURATION MECHANISM

4.1. Degradation State Machine

The system operates as a finite state machine with four main states and a nested reconfiguration process in the DEGRADED state (Fig. 2) [6, 7]. Transitions between states are determined by the survivability function value $S(t)$ and thresholds S_nom , S_deg , S_min .

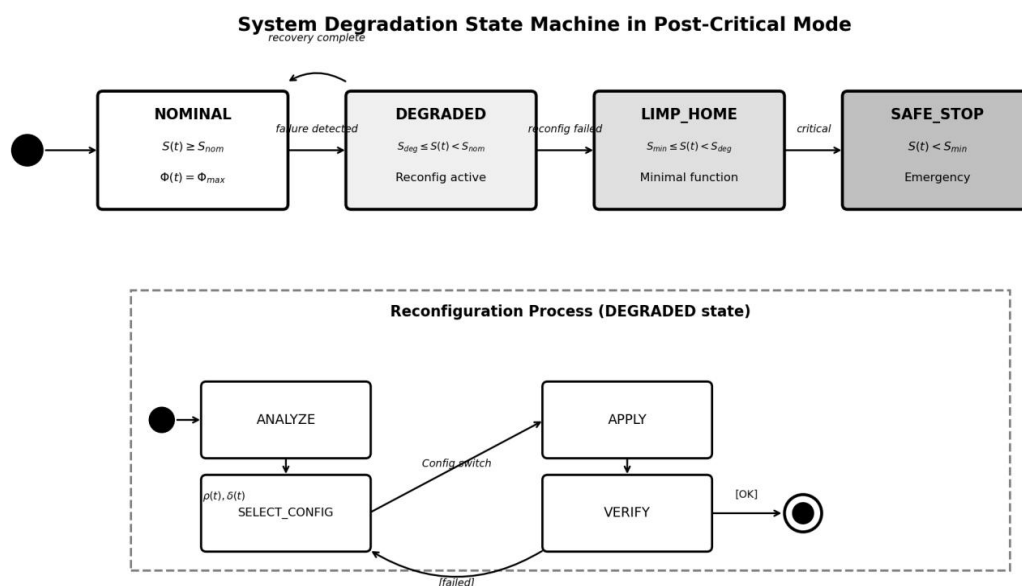


Fig. 2. System degradation state machine in post-critical mode

A key feature of the model is the presence of reverse transitions (recovery), allowing the system to return to a higher functionality level after successful reconfiguration or resource recovery. The reconfiguration process in the DEGRADED state includes stages: ANALYZE → SELECT_CONFIG → APPLY → VERIFY. Fig. 2. System degradation state machine in post-critical mode.

4.2. Optimal Configuration Selection Algorithm

Upon detecting system degradation, an optimal configuration search algorithm is launched (Fig. 3), solving the optimization problem:

$$cfg^* = \operatorname{argmax} S(cfg | \rho_1, \dots, \rho_n), (5)$$

$$\text{subject to: } \Phi(cfg) \geq \Phi_{\min}(\text{current_mode})$$

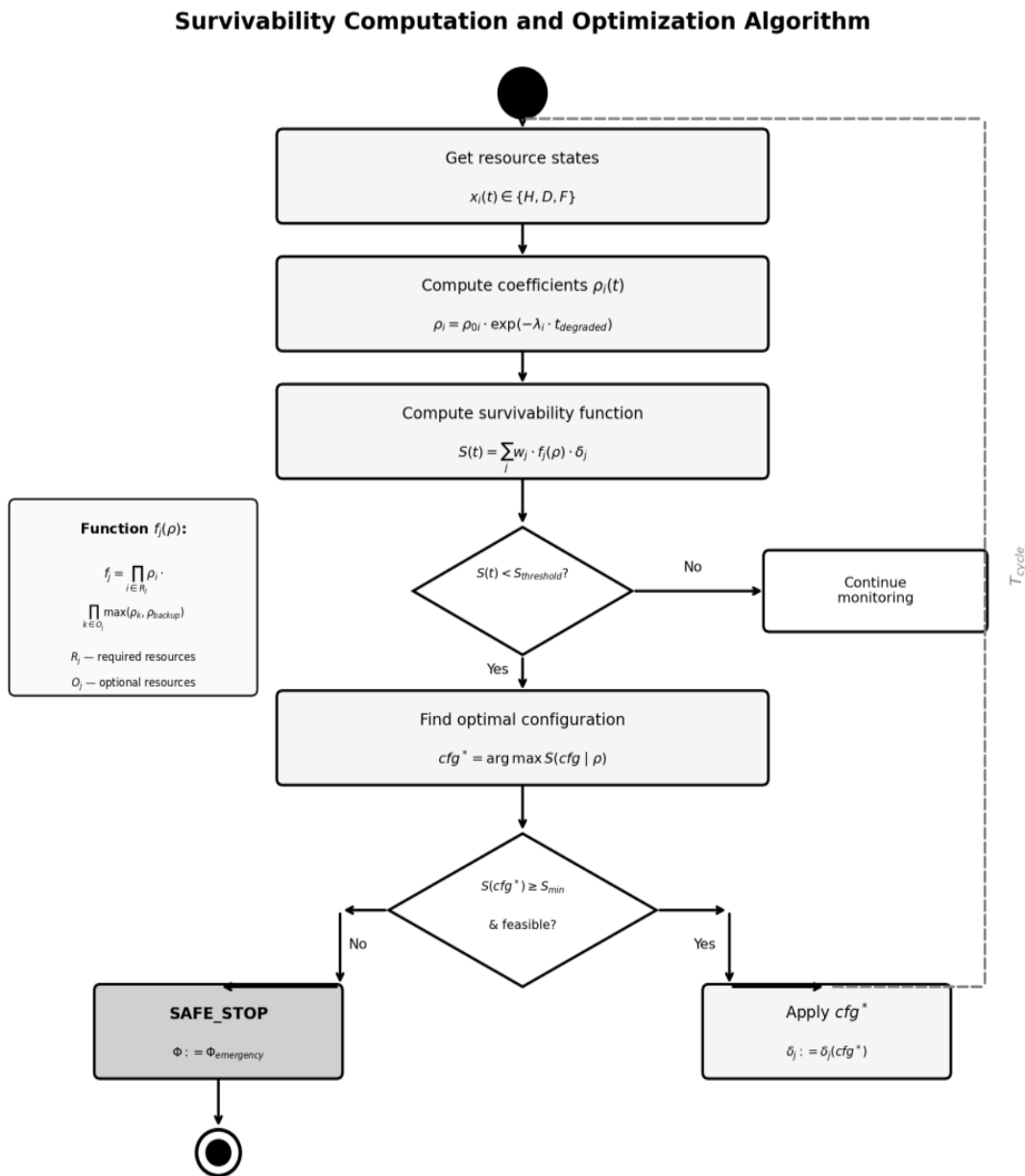


Fig. 3. Survivability computation and optimization algorithm

4.3. Reconfiguration Sequence

The reconfiguration process upon failure detection includes interaction of WdgM, SafetyManager, ConfigManager, RTE, BSW, and DEM components (Fig. 4). The sequence consists of five phases: Detection (failure detection), Analysis (computation of $S(t)$ and ρ_i), Selection (optimal configuration selection), Apply (applying new configuration), Verify (result verification).

5.1. Reconfiguration-Enabled Architecture

Practical implementation of the hierarchical survivability model is based on Post-Build Configuration architecture, allowing storage of multiple configurations in NVM and switching between them at runtime without recompilation (Fig. 5) [1, 2].

The SurvivabilityManager component implements upper levels of the abstraction

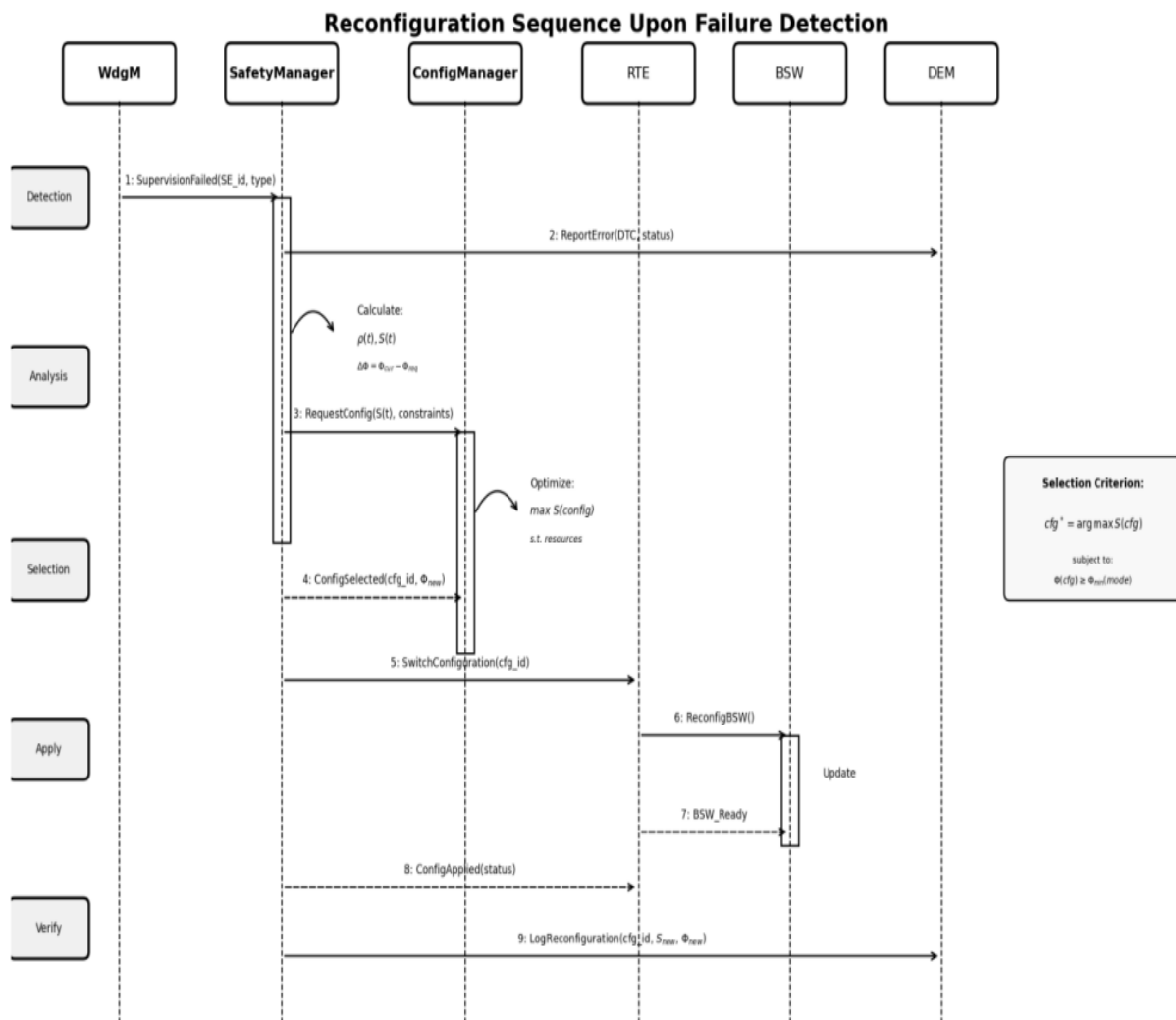


Fig. 4. Reconfiguration sequence upon failure detection

PRACTICAL IMPLEMENTATION IN
AUTOMOTIVE SYSTEMS

hierarchy and makes reconfiguration decisions based on WdgM (monitoring) data and resource state from HAL. ConfigurationManager is responsible for applying the selected

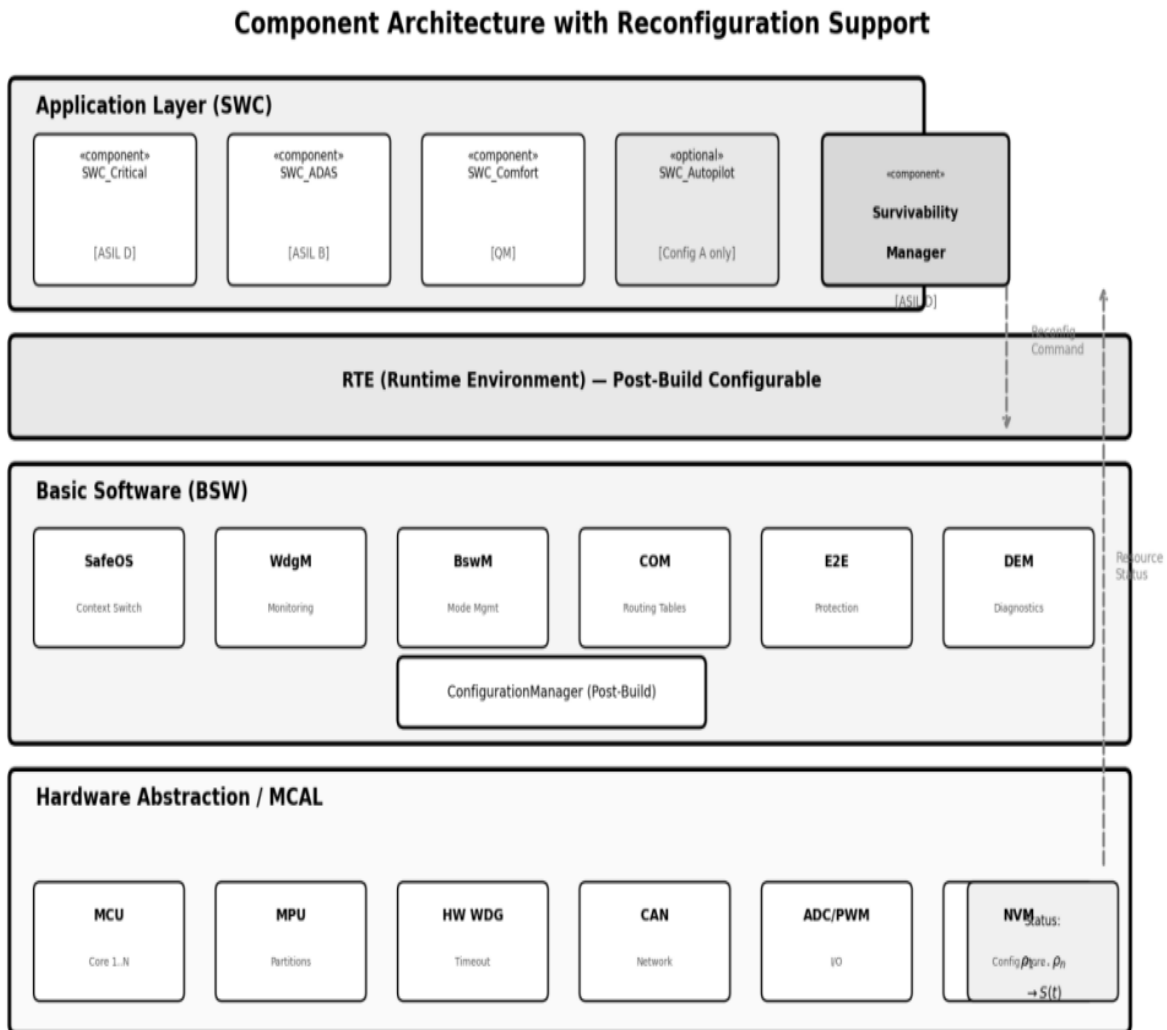


Fig. 5. Component architecture with reconfiguration support

configuration through BswM, which controls BSW module operating modes.

5.2. Survivability System Class Model

The software model of the survivability system (Fig. 6) includes classes:

SurvivabilityManager (survivability management), Resource (resource model with ρ coefficient), SystemFunction (function with weight and dependencies), Configuration (system configuration), ConfigSelector (optimal configuration selection), and LyapunovAnalyzer (stability analysis).

Class Diagram: System Survivability Model

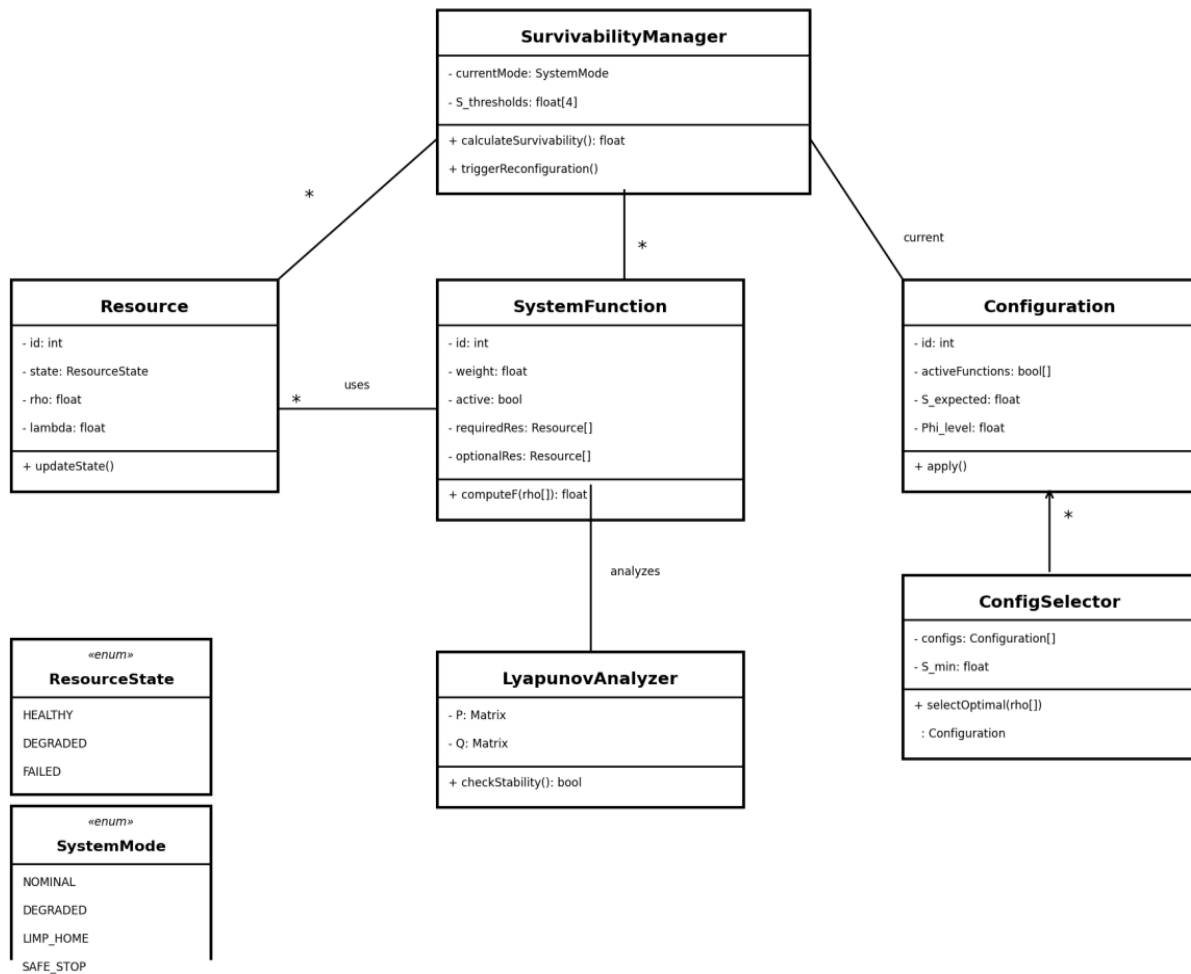


Fig. 6. Survivability system class diagram

5.3. Rapid Reconfiguration Mechanisms

To ensure minimum reconfiguration time, the following mechanisms are used:

- Post-Build Selectable Configuration — pre-compiled configurations stored in NVM and activated through BswM;
- Hot Standby Functions — backup functions maintained in ready state for instant activation;
- Partition Restart — ability to restart individual OS-Applications without affecting critical functions;
- Pre-computed Configurations — table of optimal configurations for typical degradation scenarios computed offline.

To prove system stability in post-critical state, the Lyapunov function $V(x) = x^T P x$ is used, where x is the deviation vector from the target state [4]. The system is asymptotically stable if there exists a configuration cfg^* for which the derivative $dV/dt < 0$. The condition for existence of such a configuration:

$$\exists cfg: S(cfg | \rho) \geq S_{min} \wedge \Phi(cfg) \geq \Phi_{min}(mode), \tag{6}$$

If the condition is not satisfied for any configuration, the system transitions to SAFE_STOP state with functionality $\Phi_{emergency}$, guaranteeing minimum safety.

CONCLUSIONS

This paper presents a comprehensive approach to ensuring survivability of complex

STABILITY AND CONVERGENCE ANALYSIS

super-critical systems in post-critical state.
Main results:

1. A mathematical model of system survivability $S(t) = \sum_j w_j \cdot f_j(\rho) \cdot \delta_j$ has been developed, integrating resource states, functions, and their weight coefficients, allowing quantitative assessment of system ability to execute its mission.

2. A four-level abstraction hierarchy (Mission \rightarrow Function \rightarrow Service \rightarrow Resource) is proposed, enabling decomposition of the reconfiguration task and encapsulation of implementation details.

3. An algorithm for optimal configuration selection $cfg^* = \operatorname{argmax} S(cfg)$ subject to minimum functionality constraints $\Phi(cfg) \geq \Phi_{\min}$ has been developed.

4. Practical implementation based on Post-Build Configuration architecture for automotive ECUs with rapid configuration switching support is described.

5. System stability conditions in post-critical state based on Lyapunov functions are proven, guaranteeing convergence to a stable mode or safe transition to SAFE_STOP.

REFERENCES

1. **ISO 26262:2018**. Road vehicles — Functional safety. International Organization for Standardization.
2. **AUTOSAR**. Specification of Basic Software Mode Manager. Release R22-11.
3. **Humennyi D., Humennyi O.** (2023). Established Definitions of Super-Critical Operational Modes // *Pidvodni Tehnologii*. — 2023. — Vol. 13(1).
4. **Leveson, N.G.** (2016). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2016.
5. **A. Avizienis, J. -C. Laprie, B. Randell and C. Landwehr.** (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing," in *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 11-33, Jan.-March 2004, doi: 10.1109/TDSC.2004.2.
6. **Knight, John C.** (2002). Safety critical systems: challenges and directions." *Proceedings of the 24th international conference on software engineering*, 2002.
7. **Shelton, Charles P., and Philip Koopman.** (2004). Improving system dependability with functional alternatives." *International Conference on Dependable Systems and Networks*, 2004. IEEE.
8. **Ellison, R. J., Fisher, D. A., Linger, R. C., Lipson, H. F., & Longstaff, T.** (1997). *Survivable network systems: An emerging discipline* (No. CMUSEI97TR013).
9. **W. Heimerdinger, and C. Weinstock.** (1992). A Conceptual Framework for System Fault Tolerance," Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute's Digital Library. Software Engineering Institute, Technical Report CMU/SEI-92-TR-033, 1-Feb-1992 [Online]. Available: <https://www.sei.cmu.edu/library/a-conceptual-framework-for-system-fault-tolerance/>. [Accessed: 22-Dec-2025].
10. **Laprie, Jean-Claude.** (1992). *Dependability: Basic concepts and terminology.* Dependability: Basic Concepts and Terminology: In English, French, German, Italian and Japanese, Vienna: Springer Vienna, 3-245.

Забезпечення живучості складних суперкритичних систем на основі моделі ієрархічної абстракції та адаптивної реконфігурації у післякритичному стані

Дмитро Гуменний¹

¹Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. У даній роботі представлено новий концепт забезпечення живучості складних суперкритичних систем у посткритичному стані на основі чотирирівневої ієрархії абстракції та механізму адаптивної реконфігурації. Розроблено математичну модель функції живучості $S(t)$, що інтегрує стани ресурсів, активності функцій та їх вагові коефіцієнти. Запропоновано алгоритм вибору оптимальної конфігурації системи під час деградації компонентів, що максимізує живучість за умов мінімальних функціональних обмежень. Описано практичну реалізацію механізмів швидкої реконфігурації на основі архітектури Post-Build Configuration для автомобільних ЕБК відповідно до ISO 26262.

Ключові слова: живучість системи, посткритичний стан, реконфігурація, плавна деградація, ієрархія абстракції, ISO 26262, ASIL, функція Ляпунова, суперкритичні системи.

Overview of designs and materials for printing on 3D printers that use FDM technology

Kostiantyn Pochka¹, Vadym Shalenko², Andrii Masliuk³

^{1,2,3} Kyiv National University of Construction and Architecture,
Povitryanykh Sil avenue, 31, Kyiv, 03037

¹ pochka.ki@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0355-002X>,

² shalenko.vo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6984-0302>,

³ masliuk.aa@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6349-084X>

Received 10.09.2025, accepted 01.12.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1301>

Abstract. In recent years, FDM 3D printing technology has become widely used. FDM, or fused deposition modeling, is currently the most popular, affordable, and simple method of 3D printing. It creates objects by laying down molten thermoplastic filament layer by layer on a work table, forming a part according to a digital model. The printer prints using an extruder in which molten plastic is extruded through a heated nozzle. Moving along the corresponding axes, it forms 2D layers. These layers are laid down layer by layer to create a 3D object. This technology allows you to create various prototypes of models, functional parts, and mechanisms from them. Using widely available materials (PLA, PETG, TPU) that do not require specific printing conditions, it is possible to print at home, in educational institutions, and in various workshops. Printing with special engineering plastics requires certain printing conditions and 3D printer functionality.

The widespread use of 3D printing with plastic has led to a wide variety of printers. Today, there are two types of printer mechanics. Cartesian coordinate systems and delta mechanics. Each of these mechanics is divided into specific classes, which are distributed according to the scope of application and functionality of 3D printers. These classes of 3D printers are divided into basic printers for training, semi-professional printers, professional printers, and industrial printers.

This article examines various designs of 3D printers that print using FDM technology. It considers their different functionalities and areas of application, as well as different printing materials. The authors also consider the option of creating a 3D printer based on their own design. In the future, such a 3D printer should correspond to the professional-industrial class of printers in terms of its functionality and capabilities. It should be



Kostiantyn Pochka
Head of the Department of
Vocational Training



Vadym Shalenko
Associate Professor
of the Department
of Vocational Training



Andrii Masliuk
Assistant Professor
of the Department
of Vocational Training

capable of printing with both standard (PLA, PETG, TPU) and special composite plastics (ABS, Wood, PA-CF, PA-GF, PA, nylon).

Keywords. Delta printers, 3D printers, printing, CoreXY, rod, material, composite plastic, nylon, carbon fiber, high-performance composite polymers, model, workbench.

INTRODUCTION

Today, FDM printing technology continues to develop and capture a share of the market focused on the rapid production of components of varying complexity and their prototyping prior to mass production. The use of different types of plastics for printing, which differ in

properties and printing conditions, creates certain requirements for the capabilities of 3D printers and their designs. This creates a wide variety of printers in terms of their functionality, model printing sizes, printing speed, the ability to print with different plastics, ease of printer control, and more.

RESEARCH RESULTS

Delta printers use a special system with three parallel levers connected to the print head and attached to three vertical guides at the top of the device. Each lever is moved by a separate stepper motor located at the top of the printer. The coordinated movement of these levers allows the head to move to any point in the three-dimensional workspace. The position of the extruder nozzle is determined using trigonometric calculations, which ensures high accuracy and smooth movement. Unlike classic Cartesian printers, where the platform can move along one or two axes, in delta printers the printing platform usually remains stationary. This reduces vibration during operation, contributing to stability and print quality. The stationary platform also simplifies the printer's design, reducing the number of moving parts and making maintenance easier. Thanks to lightweight levers, often made of materials such as carbon fiber, and an efficient kinematic system, delta printers are capable of achieving high printing speeds. Lightweight levers and reduced inertia allow the printer's extruder to move faster, reducing printing time. For example, the Flsun V400 3D Printer (Fig. 1) can print a model 9-10 minutes faster, which is about twice as fast as many other types of printers.

Delta printers have a cylindrical working surface, which is ideal for printing tall or cylindrical objects such as vases, figurines, or architectural models. For example, the Kossel Mini Delta printer (Fig. 2) offers a working area with a diameter of 180 mm and a height of 320 mm, allowing you to create tall models without having to split them into parts and glue them together. The printer's special mechanics also reduce the risk of mechanical inaccuracies. A fixed work table and precise lever coordination ensure stability during printing, which is

especially important for creating detailed models. Modern delta printers, such as the Flsun V400, achieve an accuracy of ± 0.15 mm, which is suitable for professional use [2].



Fig. 1. Flsun V400 Delta 3D Printer



Fig. 2. Kossel Mini Delta printer

The current variety of delta printers can be divided into four main groups: compact, professional, industrial, and specialized delta printers.

Compact delta printers for beginners and home use. These printers are designed for those who want to try 3D printing at home or in a small workshop. They have a relatively small working area, which is suitable for creating decorative figurines, toys, and small prototypes, such as models of cars or robots. These printers are compact, fit easily on a table, and are usually easy to set up. They work with basic materials such as PLA or PETG plastics and have an intuitive interface, making them an excellent choice for beginners. These printers may be limited for complex tasks. They are not always suitable for printing with composite materials such as Nylon-CCF, PLA-CF, Wood-filled PLA, PLA-LW, and others. Also, some printer models require manual calibration, which can be difficult for those who are new to 3D printing.

Professional delta printers are suitable for those who want more functionality and capabilities from a 3D printer. These printers have an enlarged working area for printing, which allows you to print large objects. They allow you to print with various plastics, including hybrid plastics with carbon fiber additives. Such printers usually have more configuration options: automatic calibration, platform heating for working with durable materials, touch screens, or remote control via a network. Professional delta printers are convenient for creating complex prototypes, design layouts, or small batches of parts, automotive components, or electronics. They are well suited for small workshops, various startups, and centers where high quality and speed are important.

A class of industrial delta printers designed for large-scale projects requiring large parts or serial production. Their working area allows them to create objects of considerable size. The ability to print specialized materials, such as metal composites or hybrid resins, makes them indispensable in industries such as aviation, automotive, and medicine. These 3D printers have greater functionality: the ability to print with multiple extruders to work with different

materials simultaneously, equipped with cameras to monitor the process in real time. They can manufacture parts for aircraft engines, medical prostheses, or architectural models with unique properties.

Specialized delta printers – this category includes printers designed for specific tasks, such as printing with ceramics, resins, or eco-friendly bio-hybrids. These 3D printers are less common, but their popularity is growing thanks to the development of new materials. Delta printers that print with ceramics are used in jewelry making or dentistry, where high precision and surface smoothness are required. Those that print with bio-hybrid materials are suitable for creating eco-friendly products that decompose naturally. Specialized printers may have a smaller working area, but they compensate for this with high precision and support for unique materials. They are ideal for modern innovative projects; in medicine, such printers can create biocompatible implants, and in design, decorative elements with unusual textures [1, 2].

The following 3D printers belong to the Cartesian coordinate system and are currently the most widespread and diverse in design compared to delta printers. Printers with a Cartesian coordinate system are the most common 3D printers that use FDM printing technology. Their key difference is their linear movement along three perpendicular axes: Y (left-right), X (forward-backward), and Z (up-down) for precise positioning. This mechanism ensures simplicity of design and high precision, although it can limit speed due to its massive moving parts. There are two basic styles of such mechanics, Prusa i3 and CoreXY, and their various variations. The Prusa i3 style is a popular option with a cantilever design, where the extruder moves along the Y/Z axis and the table moves along the X axis. The CoreXY style is a system where the extruder moves along the X and Y axes via a belt drive controlled by two stepper motors. At the same time, the work table is moved along the Z axis by a separate motor. The advantages of 3D printers with a Cartesian coordinate system include convenient calibration and printer maintenance. Due to its simplicity, high positioning accuracy of the extruder during printing is ensured. A

disadvantage is the large number of moving parts in the printer, which can cause vibration at high printing speeds [3].

Despite the wide variety of printers with a Cartesian coordinate system, they can also be divided into the following classes: basic for training, semi-professional, professional, and industrial 3D printers.

Printers similar to the Easy Three K7 mini 3D printer (Fig. 3) can be classified as basic for training purposes.

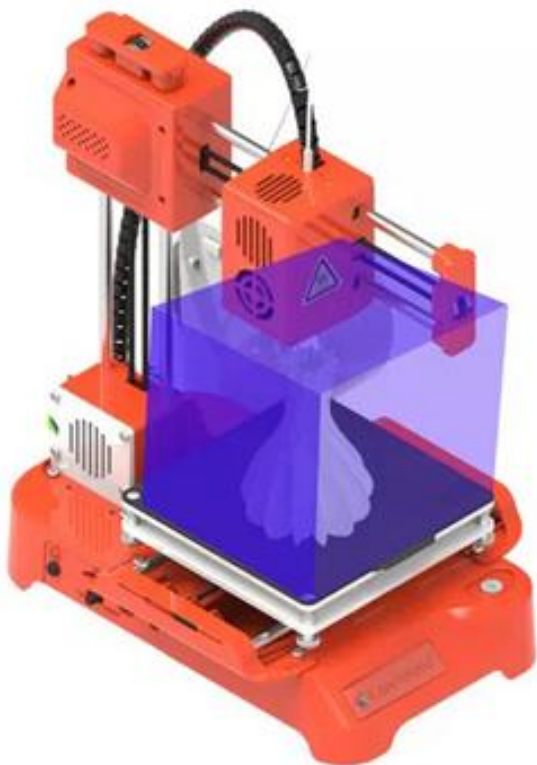


Fig. 3. Easy Three K7 mini 3D printer

When assembled, this 3D printer has small external dimensions of 235x175x270mm. The maximum print size of the model is 100x100x100mm. The printer supports a one-button printing function, which makes it very easy to use. It operates at a safe low voltage of 12 V and does not have a heated platform (table), making it safer for children and home use. Thanks to noise reduction technology, it operates very quietly. Designed for printing with PLA plastic and flexible TPU with a rod diameter of 1.75 mm. Compatible with popular slicing software such as Easyware K7, CURA, and Simplify3D. Print models can be launched via a TF card in the printer itself or via a USB cable from a computer. The printer is designed

specifically for beginners and children, which distinguishes it by its ease of use and makes it ideal for home educational printing [4, 5, 6, 13].

The following two 3D printers can be classified as semi-professional printers. The first one is the Bambu Lab A1 Mini 3D printer (Fig. 4), one of the smallest representatives in its class.



Fig. 4. Bambu Lab A1 Mini 3D printer

The Bambu Lab A1 Mini is a high-speed, compact, and extremely easy-to-use FDM printer. It has a compact design that is ideal for small desks or limited space. It is equipped with a heated work table and a print area of 180x180x180 mm. Thanks to more reliable mechanics, the printing speed can reach 500 mm/s, and the acceleration can be up to 10,000 mm/s². It has a low noise level even at high printing speeds. The printer is equipped with fully automated calibration systems: automatic table level detection, vibration compensation system during printing, and nozzle pressure detection system. These systems allow you to achieve the most perfect printing results with virtually no user intervention. The 3D printer can work with the Combo kit and the AMS Lite module. This module allows the printer to

automatically change the printing rod from the Combo set during printing. Combo is a system that has four plastic spools, which can be of different colors or different types of filament. PLA, PETG, and PVA can be used as printing materials. If flexible TPU filament is used for printing, the AMS Lite module will not work with this plastic. The printer is equipped with a 2.4-inch color IPS touch screen for control. You can connect to the printer via a Wi-Fi network and also download models for printing via a Micro SD card. Extremely easy to set up and use, it can be ready to work in less than 30 minutes. It can also have a low frame rate (1-2 fps) surveillance camera. The Bambu Lab A1 Mini 3D printer can be considered one of the best options for beginners thanks to its automatic calibration and the ability to print with multiple plastics [7].

The second 3D printer worth mentioning is the Creality Ender-3 S1 (Fig. 5). This is one of the upgraded versions of the popular Ender printer series.



Fig. 5. Creality Ender-3 S1 3D printer

One of the features of this 3D printer is its all-metal Sprite extruder with dual feed, which can heat up to 300°C. Its work table is also heated and has a printing area of 220x220x270

mm. This allows you to print a wider range of models using plastics such as PLA, ABS, Wood, TPU, PETG, PA (nylon), and even carbon fiber materials. It has an automatic work table calibration system based on a built-in CR Touch sensor, which automatically levels the platform at 16 points on the height map. This greatly simplifies the preparation process for printing and improves the quality of the first printed layer of the model. The motherboard that controls the 3D printer is built on a 32-bit microprocessor and low-noise drivers. This allows the printer to operate with minimal noise. It also has a 4.3-inch color touch screen with support for multiple languages. Assembly of the printer is simplified by the fact that it comes 96% pre-assembled. It is equipped with additional features: it has LED lighting for monitoring the printing process in the dark, can resume printing after a power failure, and has a filament end sensor [8].

There are also several interesting options in the class of professional 3D printers. One such printer is the small Flashforge Adventurer 3 (Fig. 6). This is a popular model with a closed body.



Fig. 6. Flashforge Adventurer 3 3D printer

The Flashforge Adventurer 3 3D printer is designed as a ready-to-use solution, ideal for beginners, home use, or educational institutions. The printer features a minimalist design and compact dimensions with printing

parameters of 150x150x150mm. It is the smallest representative of professional-grade 3D printers. The work surface has a flexible platform for easy removal of printed models. Its extruder has an easily removable nozzle for easy replacement. The hotend has an automatic filament loading system that makes it easier to load the rod. The closed body of the 3D printer ensures a stable temperature inside the printer and makes printing safer, especially when using ABS plastic. It can also print with other materials such as PLA, PETG, and some composite materials (e.g., with wood or metal filler). It has many additional features: for convenient monitoring of the printing process, it can be viewed remotely via Wi-Fi and supports cloud printing, allowing remote control of the printer via the Internet. It comes fully assembled and does not require complex configuration. This allows you to start printing almost immediately after unpacking and installing the printer [9].

Other 3D printers with a similar design have slightly larger printing dimensions. The most common sizes are 300x300x400mm or 400x400x600mm.

Another interesting model is the Creality CR-30 3DPrintmill ribbon 3D printer (Fig. 7). It differs significantly from the other printers discussed above.



Fig. 7. Creality CR-30 3D printer 3DPrintmill

This is a unique FDM printer that eliminates the traditional limitation on print height by offering an infinite Z-axis thanks to a roller conveyor. The working print dimensions are 200 mm in model width, 170 mm in model height, and virtually infinite in length. The only limitation is the length of the plastic filament in

the spool. This interesting design of the printer's work table allows you to print extremely long plastic models. It is also possible to print small plastic models close to small-batch production. In this mechanism, the plane of movement of the hotend is provided by stable Core-XY kinematics for accurate and reliable printing. The extruder nozzle and its central axis are positioned at a 45-degree angle to the platform. This angle ensures good adhesion of the model filament during printing. The nylon surface of the conveyor allows finished products to be automatically removed at the end of the conveyor without human intervention. It uses a powerful two-stage metal extruder "Sprite", which can print at temperatures up to 240°C. Plastics such as PLA, PETG, and TPU are used for printing. The 3D printer uses specially developed CrealityBelt slicing software, optimized for such conveyor printing. Thanks to the continuous printing function, the printer is suitable for small-batch production of large quantities of identical parts without constant supervision. Unlimited printing length is the main feature of conveyor printers. The endless belt printing platform allows you to create objects of theoretically unlimited length [10].

The next class includes industrial-grade 3D printers. They are designed for serial production, large models, and continuous 24/7 operation. They support printing with high-temperature and engineering materials such as PEEK, ULTEM, nylon, and various composites. Most of them have a large working area for printing. Professional 3D printers are suitable for engineers, designers, and various prototyping applications, offering a medium format and convenient features. When choosing such printers, it is necessary to consider the scale of the printing tasks and the materials required for this.

One such 3D printer is the CreatBot F430 (Fig. 8) – a professional closed-type device with two extruders, designed for high-temperature printing and working with a wide range of engineering and industrial plastics.

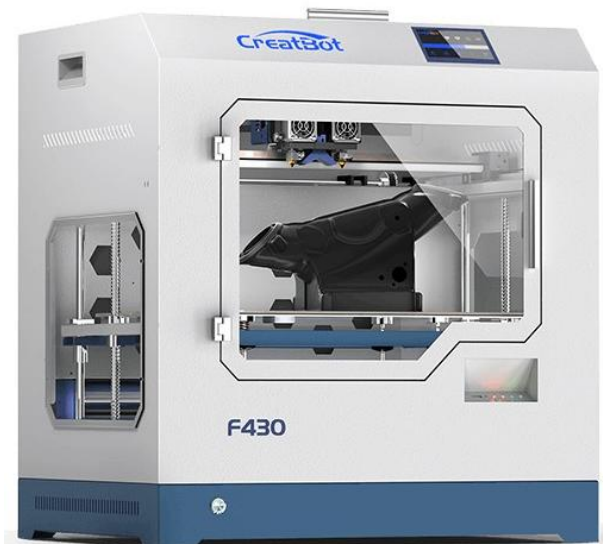


Fig. 8. Creality F430 3D printer

High-temperature printing is a key feature of this 3D printer. This is provided by an extruder that can heat up to 420°C. This allows the use of both standard (PLA, ABS, PC, TPU) and industrial materials such as nylon, fiber-reinforced materials (PA-CF, PA-GF), and other high-performance composite polymers. The printer is equipped with two extruders, allowing you to print in two colors or use soluble support materials, such as PVA plastic, to create complex geometric shapes.

Some printers in this class can be equipped with the IDEX system. IDEX (Independent Dual Extrusion) is a single extrusion system with two separate extruders that move independently on the X-axis. This makes it possible to use the system in certain printing modes.

Copy mode: copy two identical objects simultaneously, reducing waiting time by half.

Mirror Mode: print symmetrical models simultaneously from a single file.

Printing with two materials: the ability to combine, for example, durable nylon with flexible TPU. Also, the ability to use water-soluble plastics for supports, which also prevents cross-contamination of the nozzle.

In addition, IDEX offers the cleanest solution with two extruders, preventing cross-contamination. It creates a clean transition between the two materials, ensuring smooth removal and avoiding stains and mixing along the seam [11].

The printer's solid body creates a closed chamber heated to 70°C, ensuring a stable printing environment. This is critical for preventing deformation (shrinkage) when printing large objects from temperature-sensitive materials such as ABS or PC. The steel printer body ensures high stability and durability, allowing it to be used 24/7 for professional tasks. The 3D printer also has some interesting additional features. The printer can automatically remember its current position and save print data in the event of a sudden power outage. Once power is restored, it will resume printing from the last point it stopped, leaving no marks on the model. The printer monitors the availability of plastic rods and, if the filament runs out, stops the printing process and emits a warning signal to indicate that the plastic has run out. It has an air filtration system based on HEPA filters. It can adsorb vapor impurities formed during printing with special filaments such as ABS, nylon, and PC. Working with the printer becomes much safer and more environmentally friendly. The printing area can be 400x300x300mm, which is ideal for creating high-precision medium and large parts. The table surface can be covered with a special PEI film for 3D printing or Buildtak film. Thanks to this, most materials have good plastic adhesion to the platform. The automatic leveling sensor uses an intelligent system to compensate for the height of the Z-axis during printing, while providing fully automatic leveling [12].

CONCLUSIONS

The article discusses various types of 3D printers that use FDM printing technology. They are divided into Cartesian coordinate systems and delta printer systems. Each of these systems is divided into specific classes depending on the tasks performed by 3D printers. After considering the different designs and functionalities of various printers, it became necessary to design and assemble our own 3D printer.

The plan is to choose a cube-shaped printer as the basis. The printer class should combine the functionality of professional printers with the capabilities of industrial printers. It should be able to print quickly and produce large

models measuring 480x660x460 mm. It should be able to print using various plastics, from standard to special engineering plastics. Work on assembling such a 3D printer is planned for the future.

REFERENCES

1. **Official website of the Flsun V400 3D Printer** [Internet resource]. URL: <https://flsun3d.com/>.
2. **Official website of the Kossel Mini Delta printer** [Internet resource]. URL: <https://reprap.org/wiki/Kossel>.
3. **The FDM method – the technology that made 3D printing accessible** [Internet resource]. URL: <https://3dplast.biz/ua/a398990-metod-fdm-tehnologiya.html>.
4. **Official website of the Easy ThreeD K7 mini 3D printer** [Internet resource]. URL: https://www.toy123d.com/en/pd.jsp?fromCollId=1490&id=50#_pp=1490_3434.
5. **Shalenko V. O., Maslyuk A. A., Bakuyems'kyi M. V.** (2025). Osoblyvosti vykorystannya 3D-pryntera u navchal'nomu protsesi pry zvaryuvanni [Features of using a 3D printer in the educational process in welding]. Aktual'ni problemy osvity oho protsesu v konteksti yevropeys'koho vyboru Ukrayiny: materialy VII Mizhnarodnoyi konferentsiyi, 14 lystopada 2024 roku [Current problems of the educational process in the context of Ukraine's European choice: materials of the VII International Conference, November 14, 2024]. Kyiv: Lira-K Publishing House. 484-486. (in Ukrainian). URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/zbirnyk-materialiv_7_mizhnarodnoyi-konferentsiyi-knuba-14.11.2024.pdf.
6. **Shalenko V. O., Korniychuk B. V., Maslyuk A. A.** (2020). Kintsevyi vumyach osi Z 3D-prynter [Z-axis limit switch 3D printer]. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, constructional, road and melioration machines], (96). 22-27. DOI: 10.32347/gbdmm2020.96.0301. (in Ukrainian). URL: <http://gbdmm.knuba.edu.ua/issue/view/14069>.
7. **Official website of the Bambu Lab A1 Mini 3D printer** [Internet resource]. URL: <https://bambulab.com/en-eu/a1-mini>.
8. **Official website of the Creality Ender-3 S1 3D printer** [Internet resource]. URL: <https://www.creality.com/ru/support#flagship-series>.
9. **Official website of the Flashforge Adventurer 3 3D printer** [Internet resource]. URL: <https://www.flashforge.com>.
10. **Official website of the Creality CR-30 3DPrintmill ribbon 3D printer** [Internet resource]. URL: <https://center3dprint.com/ua/strichkovyy-3d-prynter-creality-cr-30-3dprintmill>.
11. **Official website of the Snapmaker J1/J1S 3D printer** [Internet resource]. URL: https://wiki.snapmaker.com/en/snapmaker_j1/manual.
12. **Official website of the CreatBot F430 3D printer** [Internet resource]. URL: <https://www.creatbot.com/ru/f430>.
13. **Shalenko V. O., Maslyuk A. A., Aks'onov M. S.** (2024). Vykorystannya 3D-pryntera v navchal'nomu protsesi pry vyvchenomu kursi «Materialoznavstvo» [Use of a 3D printer in the educational process when studying the course “Materials Science”]. Aktual'ni problemy osvity oho protsesu v konteksti yevropeys'koho vyboru Ukrayiny: materialy VI Mizhnarodnoyi konferentsiyi, Kyiv: KNUBA, 16 lystopada 2023 roku [Current issues in the educational process in the context of Ukraine's European choice: materials from the VI International Conference, Kyiv: KNUBA, November 16, 2023]. Kyiv: TSP «KOMPRYNT». 446-448. (in Ukrainian). URL: <https://fait.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/zbirnyk-materialiv-vi-mizhnarodnoyi-konferentsiyi-knuba-16.11.2023.pdf>.

Огляд конструкції та матеріалів для друку на 3D-принтерах, які друкують по технології FDM

Костянтин Почка¹, Вадим Шаленко²,
Андрій Маслюк³

^{1,2,3}Київський національний університет
будівництва і архітектури

Анотація. За останні роки розвитку технологій 3D-друку по технології FDM набули великого поширення. FDM або моделювання методом пошарового наплавлення – це найпопулярніший, доступний і простий спосіб 3D-друку на сьогодні. Він створює об'єкти, накладаючи розплавлений термопластичний пруток (філамент) шар за шаром на робочому столі, формуючи деталь згідно цифрової моделі. Принтер друкує використовуючи екструдер у якому розплавлений пластик видавлюється через нагріте сопло. Рухаючись по відповідним

вісям формує 2D-шари. Ці шари накладаються шар на шар створюючи 3D-об'єкт. Ця технологія дозволяє створювати різні прототипи моделей, функціональні деталі та механізми з них. Використовуючи широко доступні матеріали (PLA, PETG, TPU), які не вимагають специфічних умов друку, дозволяють друкувати у домашніх, навчальних закладах та різних майстернях. Друк спеціальними інженерними пластиками вимагає певних умов друку та функціоналу 3D-принтера.

Широке застосування 3D-друку з пластику створює велике різноманіття принтерів для друку. На сьогодні існує два різновиду механіки принтерів. На системі декартових координат та дельта механіка. Кожна з цих механік розподіляється на певні класи, які розподіляються від сфери застосування та функціоналу 3D-принтерів. Такі класи 3D-принтерів поділяються на базові для навчання,

полупрофесійні, професійні та промислові принтери.

У даній статті розглядають різні конструкції 3D-принтерів, які друкують по технології FDM. Розглядають їх різний функціонал та сферу застосування, такими різні матеріалом для друку. Автори також розглядають варіант створення 3D-принтера за власним проектом. Такий 3D-принтер у майбутньому за своїм функціоналом та можливостями повинен відповідати професійно-промислому класу принтерів. Для можливості реалізації друку, як стандартними (PLA, PETG, TPU) так і спеціальними композитними пластиками (ABS, Wood, PA-CF, PA-GF, PA, нейлон).

Ключові слова: Дельта-принтери, 3D-принтери, друк, CoreXY, пруток, матеріал, композитний пластик, нейлон, вуглецеве волокно, високопродуктивні композитні полімери, модель, робочий стіл.

Методика проведення лабораторних досліджень різання ґрунту деформатором з ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі

Микола Пристайло¹, Андрій Поліщук², Ігор Гонта³

^{1,2,3} Київський національний університет будівництва і архітектури
пр-т Повітряних Сил, 31, м.Київ, Україна, 03037

¹ prystailo.mo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>,

² polishchuk.ah@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4808-9932>,

³ honta_ip-2022@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0002-4441-8049>

Received 03.09.2025, accepted 29.10.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1302>

Анотація. У роботі наведено методику лабораторних досліджень процесу різання ґрунту деформатором із ріжучою кромкою, кінематично пов'язаною з пневмоаккумулятором. Як модель ґрунту застосовано парафін, який дозволяє оптично виявляти напружені зони за допомогою поляризаційного аналізу. Описано конструкцію лабораторної установки, деформатора та пневмоаккумулятора, послідовність підготовки парафінової моделі, методику проведення експериментів, а також алгоритм обробки експериментальних даних. Запропоновано узагальнені регресійні залежності для опису впливу глибини занурення, швидкості руху деформатора та тиску в пневмоаккумуляторі на силу різання та питомі енерговитрати. Наведено словесний опис типових графіків залежностей та приклади рівнянь регресії. Показано, що застосування ріжучої кромки на пневмоаккумуляторі дозволяє знизити пікові значення сили різання та розосередити напруження в моделі ґрунту.

Ключові слова: різання ґрунту, парафінова модель, фізичне моделювання, ріжуча кромка, пневмоаккумулятор, енергосилові параметри, регресія, оптична візуалізація.

ВСТУП

Ефективність роботи землерийних і гірничих машин значною мірою визначається характером взаємодії робочого органа з ґрунтом. Відомо, що процес різання супроводжується значними динамічними навантаженнями та нерівномірним розподілом сил уздовж ріжучої кромки, що призводить до підвищених енерговитрат, вібрацій і інтенсивного зношування робочих органів. Це підтверджується численними дослідженнями, виконаними для відвальних



Микола Пристайло
Професор кафедри
будівельних машин



Андрій Поліщук
асистент кафедри
будівельних машин



Ігор Гонта
аспірант кафедри
будівельних машин

робочих органів, ковшів та спеціальних деформаторів[1].

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності є застосування динамічних робочих органів, у яких ріжуча кромка здійснює зворотно-поступальний або коливальний рух, а також оснащується пристроями енергетичного накопичення та демпфування – зокрема, пневмоаккумуляторами. Такі рішення дозволяють перерозподілити навантаження в часі, зменшити пікові сили різання та поліпшити умови руйнування ґрунту[2].

Для обґрунтування параметрів деформатора з ріжучою кромкою на

пневмоаккумуляторі необхідні лабораторні дослідження з можливістю не лише вимірювання силових показників, а й візуалізації напруженого стану ґрунтового середовища в зоні різання. Саме тому доцільно застосовувати моделі ґрунту, придатні для оптичної (фотоеластичної) реєстрації полів напружень. Парафін відноситься до таких матеріалів і широко використовується в експериментальній механіці для моделювання квазікрихких та пластичних середовищ. Класичні підходи до моделювання процесів різання ґрунту робочими органами землерийних машин базуються на роботах Ю.О. Ветрова, В.Л. Баладинського, Л.А. Хмари, та інших, де сформульовано закономірності формування стружки, сил опору та енергетичних витрат[3].

У наукових працях, виконаних за участю співавторів, розглянуто:

- навантаження на робочий орган відвального типу, розподіл сил уздовж ріжучої кромки та вплив дії динамічного елемента на характер навантаження[4];
- конструктивні рішення ковшів для розробки мерзлого ґрунту, що враховують особливості руйнування мерзлик порід[5];
- вплив лідируючої ріжучої кромки деформатора на процес різання ґрунту, де показано, що попереднє надрізання та формування тріщин дозволяє знизити силові навантаження на основну кромку[6];
- удосконалення реєстрації сил різання в лабораторних умовах і створення стендів для вимірювання силових параметрів процесу різання;
- розроблення та патентування стенда реєстрації зусиль різання, що містить спеціалізований силовимірювальний вузол[7].

Разом з тим у наявних працях основна увага зосереджена на силових параметрах та кінематичних особливостях робочих органів. Питання оптичної візуалізації напруженого стану ґрунтового середовища в зоні різання, особливо для деформатора з ріжучою кромкою, пов'язаною з

пневмоаккумулятором, залишаються менш розробленими.

Відсутність детально описаної методики, яка б поєднувала:

- використання парафінової моделі ґрунту,
 - поляризаційний аналіз (фотоеластіку),
 - та одночасну реєстрацію сил різання й параметрів пневмоаккумулятора,
- утворює науково-практичну нішу, яку й заповнює дана робота.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Мета роботи – розробити та обґрунтувати методику лабораторних досліджень процесу різання ґрунту деформатором із ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі з використанням парафінової моделі ґрунту та оптичної реєстрації напруженого стану.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Обґрунтувати вибір парафіну як моделі ґрунту для оптичного аналізу напружених зон.
2. Описати конструкцію деформатора з ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі та лабораторної установки для досліджень.
3. Розробити послідовність приготування парафінової моделі та налаштування поляризаційної оптичної системи.
4. Сформулювати програму експериментальних досліджень з варіюванням глибини різання, швидкості руху деформатора та тиску в пневмоаккумуляторі.
5. Запропонувати алгоритм обробки експериментальних даних, включаючи визначення сил різання, питомої роботи та параметрів напруженого стану за оптичними смугами.
6. Побудувати та проаналізувати регресійні залежності, які описують вплив основних факторів на силові та енергетичні показники процесу.

Лабораторна установка для дослідження процесу різання моделі ґрунту

деформатором із ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі включає:

- ґрунтовий лоток з прозорими боковими стінками (органічне скло або загартоване скло), що забезпечують візуальний доступ до моделі;
- механізм переміщення деформатора з плавним регулюванням швидкості в діапазоні, наприклад, 0,01–0,10 м/с;
- деформатор з ріжучою кромкою, шарнірно або пружно зв'язаною з корпусом через пневмоаккумулятор;
- силовимірювальний вузол, який реєструє горизонтальну силу різання $F(t)$ та, за необхідності, вертикальну складову $N(t)$
- гідروпневматичний контур, що включає пневмоаккумулятор, запірну та регульовальну арматуру, датчик тиску $p_{ак}(t)$
- систему збору даних, яка одночасно реєструє сигнали від тензодатчиків, датчиків тиску та переміщення.



Рис. 1. Лабораторна установка для дослідження процесу різання моделі ґрунту деформатором із ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі

Використані підходи до побудови силовимірювального стенда узгоджуються з раніше розробленими рішеннями для реєстрації зусиль різання[8].

Робочий орган являє собою деформатор клиноподібного типу з основною ріжучою кромкою та, за необхідності, лідируючою кромкою, що випереджає основну й формує попередній надріз у моделі ґрунту, як це показано в попередніх роботах[9] (рис. 1.).

Ріжуча кромка шарнірно приєднана до корпусу деформатора та зв'язана з ним через пневмоаккумулятор. При проходженні

ділянок з підвищеним опором ріжуча кромка відхиляється, стискаючи робоче середовище в аккумуляторі. Після проходження перешкоди частина накопиченої енергії повертається в систему, забезпечуючи вирівнювання навантаження.



Рис.2. Деформатор з ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі

Основними регульованими параметрами є:

- кут загострення ріжучої кромки α ;
- кут установки кромки відносно напрямку руху;
- початковий тиск у пневмоаккумуляторі $p_{ак}$, θ_p
- жорсткість газової «пружини» (характеристика $p(V)$).

Як модель ґрунту застосовується блок парафіну розміром, наприклад, $L \times B \times H = 0,8 \times 0,2 \times 0,1$ м.

Парафін вибрано з таких причин:

- він є оптично чутливим матеріалом, що дозволяє реєструвати картини ізохром та ізоклін у поляризованому світлі;
- легко піддається плавленню та заливанню в потрібну форму;
- його механічні характеристики (межа текучості, модуль пружності) добре вивчені та відтворювані.

Перед випробуваннями парафін дегазується, заливається в лоток у один шар і витримується до повного охолодження для уникнення внутрішніх тріщин. Динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської

конструкції КНУБА [2] доопрацьовано (рис. 2).



Рис. 3. Модель ґрунту з парафіну

На бокових поверхнях тензобалки 1 наклеєні тензодатчики Д1-Д4, що реєструють дотичну силу P , яка діє на абразивний армований круг. На горизонтальній тензобалці 2 – тензодатчики Д5-Д8, що реєструють нормальну силу N , (рис. 4).

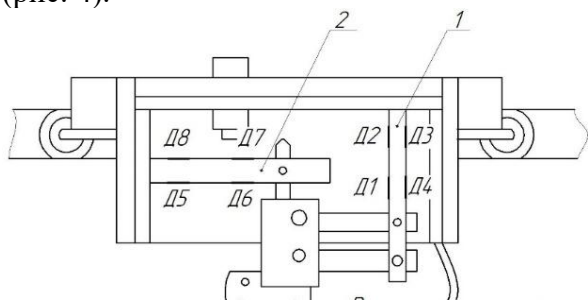


Рис. 4. Схема розташування тензодатчиків на динамометричному візку

Групи тензодатчиків включено в електричні мостові схеми, що показані на рисунку 4. Сила різання передається тензодатчикам деформації яких трансформуються в зміну опору вимірювальних елементів, так у всіх мостових схемах з'являється розбаланс.

В основу методів вимірювання датчиками опору покладений тензOMETричний ефект – зміна електричного (тобто омичного) опору металевого дроту датчика при його пружній деформації [3].

Датчики наклеєні на поверхню тензOMETричної балки, що деформується, полімерним клеєм по спеціальній технології. При проходженні через датчики

електричного струму в результаті деформації тензOMETричної балки змінюється опір датчиків. В результаті зміниться напруга в електричному ланцюзі. Оскільки деформація пропорційна силам, які її викликають, то їм буде пропорційна зміна напруги струму в електричному колі.

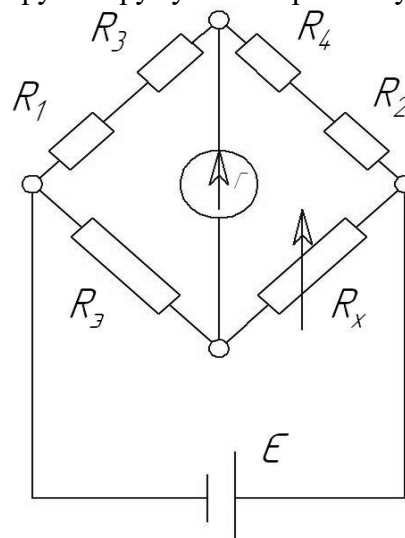


Рис. 5. Схема з'єднання тензOMETричних датчиків у вимірювальні мости

Датчики з'єднуються в мостову схему. В даному випадку на кожен тензOMETричну балочку (рисунок 5) наклеєно по чотири датчики, які одночасно виконують функції робочих та компенсаційних датчиків. Таке підключення датчиків дозволяє реєструвати тільки різницю напруги на базовій ділянці балочки li , замкненій між датчиками.

Станові балансу тензOMETричних схем вимірювання дотичної та нормальної складової сил, що діють на абразивний армований круг та відповідають рівності

$$(R_1 + R_3)R_x = (R_2 + R_4)R_{\Sigma};$$

$$(R_5 + R_7)R_x = (R_6 + R_8)R_{\Sigma};$$

де $R_{1...8}$ – опір тензодатчиків (плечі моста опору); R_{Σ} – еталонний опір; R_x – вимірювальний опір.

В комплект вимірювальної апаратури (рис. 6) входить: блок живлення 1; кабель живлення 2; модуль АЦП (аналогоцифровий перетворювач); штистиканальний підсилювач та мікроконтролерний блок керування 3; кабель передачі сигналу (інтерфейс SCI – Serial Communication

Interface) 4; та персональний комп'ютер (надалі ПК) 5[12].

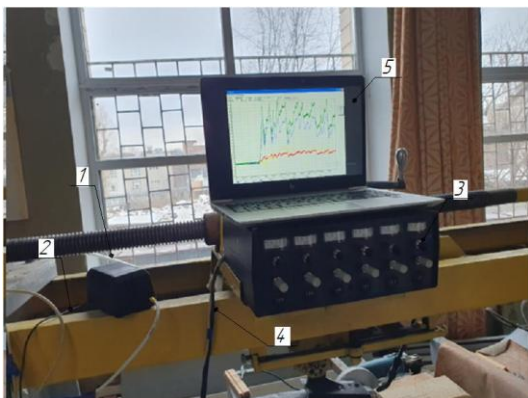


Рис. 6. Комплект виміральної апаратури

Сигнал розбалансу моста з включенням тензодатчиків підсилюється за допомогою інструментальних операційних підсилювачів (рис. 7), увімкнених за схемою диференціального підсилювача (рис. 8) з погашенням синфазних перешкод[13].

Завдяки цьому вдається підсилити дуже малий рівень електричних коливань з уникненням зростання паразитних шумів та прямою передаточною характеристикою. Також, завдяки включенню за такою схемою, вдається уникнути дрейфу нуля, який притаманний звичайним схемам операційних підсилювачів[4, 14].

За умови $R_4 R_7 = R_5 R_6$ передаточну функцію можна представити у вигляді:

$$U_{вих} = \frac{R_5}{R_4} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_2} \right) (U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (5)$$



Рис. 7. АЦП з блоком підсилювачів

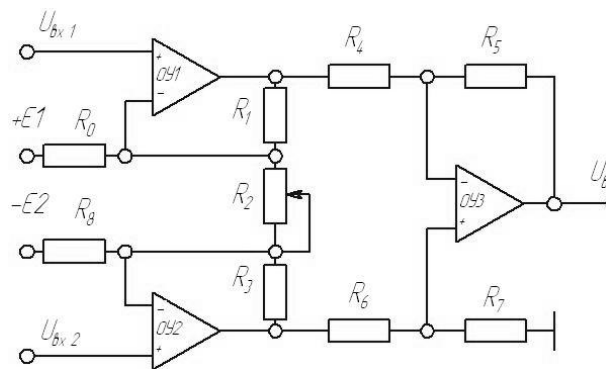


Рис. 8. Схема диференціального підсилювача

Відмінною особливістю розглянутої схеми є повна незалежність регулювання коефіцієнта підсилення від виконання умови.

В якості операційних підсилювачів використані сучасні інструментальні підсилювачі виробництва Analog Devices.

Підсилений сигнал подається на модуль АЦП для подальшої обробки. Прилад працює в двох режимах з коефіцієнтом підсилення сигналу 1 та 2.

В якості АЦП використаний 10-ти розрядний модуль, який входить до складу мікроконтролера сімейства PIC (Peripheral Interface Controller) (рис. 9).

Час перетворення АЦП для запропонованого контролера визначається за формулою:

$$T_{AD} = N \cdot T'_{AD} + (11 - n)(2T_{OSC}),$$

де T'_{AD} – час аналого-цифрового перетворення на один біт (рекомендовано $1,6 \cdot 10^{-6}$); n – кількість розрядів АЦП; T_{OSC} – тривалість одного такту синхронізуючих імпульсів.

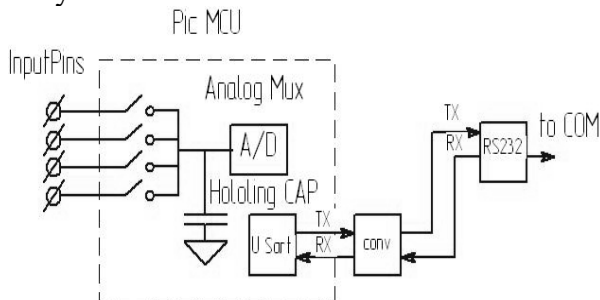


Рис. 9. Загальна схема пристрою для АЦП

В середньому при частоті тактового генератора 20 МГц час перетворення по одному каналу складає $17,6 \cdot 10^{-6}$.

При цьому точність перетворення залежить від кроку квантування, який слід розрахувати за формулою:

$$\Delta_u = \frac{U_{REF}}{2^n}$$

де U_{REF} – опорна напруга (5В);

$$\Delta_u = \frac{5}{2^{10}} = \frac{5}{1024} = 4.9mB$$

Інтерфейс RS232 має нетипові рівні напруг, тому для узгодження з рівнями інтерфейсу мікроконтролера необхідно використовувати перетворювач CONV.

Цифровий сигнал подається на ПК для подальшої обробки за допомогою спеціально написаної програми, під назвою “Tenzo Cut” [5].

В результаті відбувається реєстрація сигналу в реальному часі та виведення його на екран у вигляді графіка (рис. 10).

Програма дозволяє:

- одночасно реєструвати дані з двох груп датчиків;
- приводити дані до загальної ординати зображення;
- проводити тарування, тобто перехід від ординати зображення до сили, що діють на абразивний армований круг.
- обробляти дані (знаходити середнє значення та середньоквадратичне відхилення на заданому проміжку);
- зберігати дані в файлі на будь-якому етапі реєстрації та обробки;
- зберігати дані у вигляді таблиці чисел для подальшої обробки іншими програмами аналізу табличних даних (наприклад, Origin або Microsoft Excel).

Розроблене високотехнологічне вимірювально – реєструюче обладнання дозволяє швидко і без повторювань з першочергових даних отримувати точні оцінки взаємодії деформатора з ґрунтом та дає можливість обробляти їх за допомогою сучасного програмного забезпечення, що

позбавить від трудомісткого процесу обробки даних.

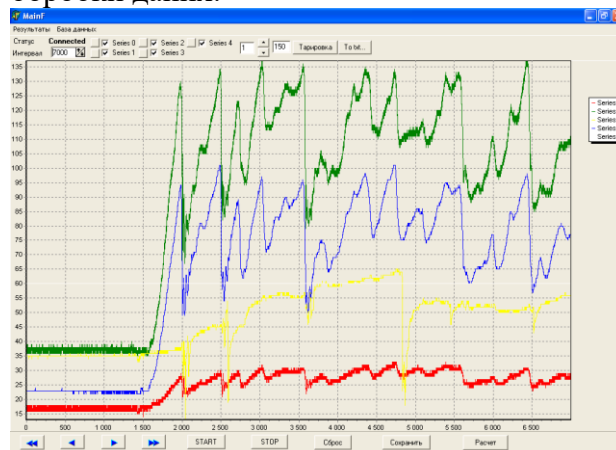


Рис. 10. Вигляд відтвореного сигналу на екрані

Для оптичної реєстрації напружених зон застосовується поляризаційний стенд:

- джерело рівномірного світла (світлодіодний або галогенний освітлювач із матовим екраном),
- вхідний поляризатор,
- аналізатор, орієнтований під певним кутом до поляризатора (для отримання ізохром або ізоклін),
- цифрова камера або високошвидкісна камера для реєстрації процесу в часі.

Підготовка парафінової моделі

1. Парафін подрібнюється та плавиться у термостійкій ємності до однорідного стану.
2. Розплавлений парафін заливається у ґрунтовий лоток шаром завтовшки 20–30 мм.
3. Повільне охолодження (наприклад, у термошафі з поетапним зниженням температури) зменшує внутрішні напруження та тенденцію до утворення тріщин.
4. Перед випробуваннями поверхню парафінового блоку вирівнюють та, за необхідності, наносять координатну сітку для подальшої прив'язки зон напружень.

Налаштування оптичної системи.

1. Вмикається джерело світла, встановлюється рівномірне освітлення площини парафінової моделі.

2. Поляризатор і аналізатор налаштовуються на положення «темного поля».
3. Для калібрування фотоеластичної системи застосовується зразок парафіну зі відомим напруженим станом (наприклад, вигнута пластинка), за допомогою якого визначається стрес-оптичний коефіцієнт f_{σ} .
4. Налаштовуються параметри відеозапису (частота кадрів, експозиція) з урахуванням швидкості процесу різання[6].

Програма експериментальних досліджень

Основними керованими факторами є:

- глибина різання h (наприклад, 10; 20; 30 мм);
- швидкість руху деформатора v (наприклад, 0,02; 0,05; 0,08 м/с);
- початковий тиск у пневмоакумуляторі $p_{ак}$ (наприклад, 0,3; 0,5; 0,7 МПа).

План експерименту може бути реалізований як повний факторний або дробовий факторний план, що дозволяє оцінити як основні ефекти, так і їх взаємодію[7].

Послідовність проведення окремого досліджу

1. Встановити заданий тиск у пневмоакумуляторі та зафіксувати його значення.
2. Встановити деформатор у початкове положення, визначити глибину занурення h .
3. Увімкнути систему збору даних та відеозапис оптичної картини.
4. Запустити привід механізму переміщення деформатора з необхідною швидкістю v .
5. Під час руху деформатора реєструються:
 - сила різання $F(t)$
 - переміщення $s(t)$;
 - тиск у пневмоакумуляторі $p_{ак}(t)$;
 - оптичні зображення (кадри оптичних смуг).

6. Після завершення проходу деформатора по довжині лотка зупинити привід і зберегти всі дані.
7. За необхідності модель парафіну локально підігрівають та відновлюють початкову форму для повторних дослідів.

Миттєве значення сили різання $F(t)$ отримується з тензодатчиків. Для кожного досліджу визначають:

- максимальне значення сили різання: $F_{max} = \max F(t)$;
- середню силу різання на інтервалі стабільного руху:

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt$$

де $T = t_2 - t_1$ – тривалість стабільного режиму;

- роботу різання на ділянці довжиною L :

$$A = \frac{1}{bh} \int_0^L F(s) ds$$

де b – ширина деформатора, h – глибина різання, s – шлях руху деформатора в парафіновому блоці.

Для узагальнення результатів зручно переходити до безрозмірної питомої роботи

$$A^* = \frac{A}{A_0}$$

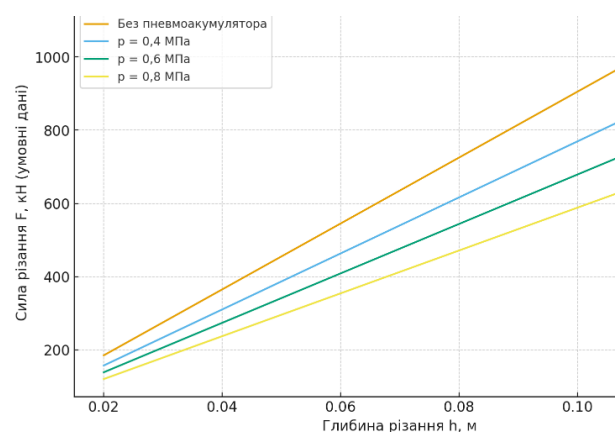


Рис. 11. Залежність сили різання (умовної) від глибини

Крива має зростаючий характер – при збільшенні глибини різання з 10 до 30 мм максимальна сила різання зростає більш ніж у два рази[8]. При цьому, завдяки роботі

пневмоакумулятора, піки сили згладжуються: амплітуда коливань $F(t)$ зменшується, що відображається як більш плавний графік у часі у порівнянні з деформатором без акумулятора[9].

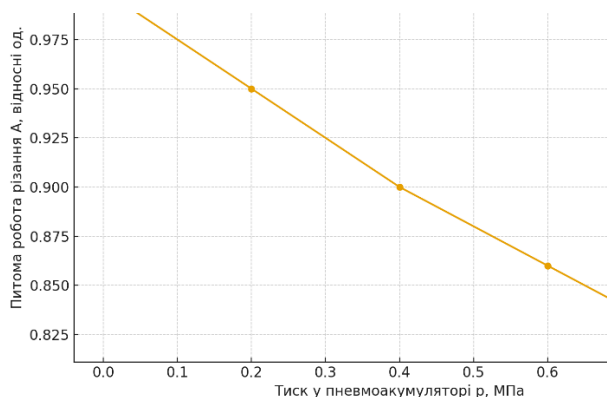


Рис. 12. Вплив тиску в пневмоакумуляторі на силу різання

Крива починається з максимального значення сили різання при мінімальному тиску в пневмоакумуляторі і плавно знижується зі збільшенням p . У діапазоні, наприклад, від 0,3 до 0,7 МПа, зменшення F_{max} може становити 15–35 % залежно від глибини різання. Лінії для різних глибин h розташовані майже паралельно, причому при більшій глибині рівень сил вищий на постійне зміщення. Фотоеластичний аналіз[10].

Для кожного кадру відео визначають порядок ізохром N у точках, що відповідають зоні контакту та околу ріжучої кромки. Згідно із законом фотоеластики, різниця головних напружень:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf_\sigma}{At}$$

За результатами обробки можна апроксимувати отриману залежність, наприклад, експоненційною функцією:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0 \exp\left(-\frac{x}{l_0}\right),$$

де σ_0 – максимальна різниця головних напружень біля кромки, l_0 – характерна довжина затухання напружень, x – відстань від ріжучої кромки..

- f_σ – стрес-оптичний коефіцієнт матеріалу парафіну;
- t – товщина парафінової моделі в напрямку променя.

Таким чином, отримують картину розподілу $\sigma_1 - \sigma_2$ у площині різання. На основі послідовності кадрів аналізується еволюція зон підвищених напружень у часі[11].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику лабораторних досліджень різання ґрунту деформатором із ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі, яка поєднує силові вимірювання та оптичну реєстрацію напруженого стану парафінової моделі ґрунту.

2. Обґрунтовано вибір парафіну як моделі ґрунту, що забезпечує можливість фотоеластичного аналізу зон підвищених напружень і відтворюваність механічних властивостей.

3. Описано конструкцію лабораторної установки, включно з деформатором, пневмоакумулятором, силовимірювальним вузлом та оптичним стендом.

4. Запропоновано алгоритм обробки експериментальних даних, що включає визначення сил різання, питомої роботи та різниці головних напружень за законом фотоеластики.

5. Наведено форми регресійних моделей, які описують вплив глибини різання, швидкості руху деформатора та тиску в пневмоакумуляторі на максимальну силу різання та питомі енерговитрати.

6. Показано (на рівні узагальнених результатів), що збільшення тиску в пневмоакумуляторі приводить до зниження пікових значень сили різання до 15–35 % та зменшення концентрації напружень у зоні контакту з моделлю ґрунту.

7. Запропонована методика може бути використана для подальшої оптимізації параметрів деформаторів, розробки нових конструкцій робочих органів землерийних

машин та перевірки чисельних моделей процесу різання ґрунту.

REFERENCES

1. **Blokhin V. S., Malich M. H.** (2009). Osnovni parametry tekhnolohichnykh mashyn. Mashyny dlia zemlianykh robot [Basic parameters of technological machines. Machines for earthworks]. Kyiv: Vyscha shkola, Part 2. 455. (in Ukrainian).
2. **Balaka M. M., Antonkov M. O.** (2014). Analiz metodiv, zasobiv i tekhnolohii intensyfikatsii vykonannya zemlianykh robot na merzlykh gruntakh [Analysis of the methods, means and technologies intensification of earthworks on the frozen soils]. Suchasni innovatsiini tekhnolohii pidgotovky inzhenernykh kadriv dlia hirnychoi promyslovosti i transportu: International Conference Proceedings (March 27–28, 2014). Dnipropetrovsk: National Mining University, 147–156. (in Ukrainian).
3. **Look B. G.** (2022). Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction. Boca Raton. CRC Press, 590.
4. **Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I.** (2023). Innovative ways to improve machines for preliminary work given the needs of the modern construction industry. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny. (102). 49–57. URL: <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.102.0402>.
5. **Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I.** (2024). Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Vol. 1 No.105. 61–67. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61>.
6. **Knappett J., Craig R. F.** (2019). Craig's Soil Mechanics. 9th ed. Boca Raton. CRC Press, 654.
7. **Pelevin L. Ye., Prystailo M. O.** (2011). Vyznachennia pratsezdatsnosti robochykh orhaniv zemleryinykh mashyn [Efficiency determination of working elements for earthmoving machines]. Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, (77). 96–100. (in Ukrainian).
8. **Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D.** (2021). Information model of bulldozer-looser movement. The world of science and innovation: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021). Cognum Publishing House. London, United Kingdom, 54–59.
9. **Vietrov Yu. O., Vlasov V. V.** (1995). Mashyny dlia zemlianykh robot. Pryklady rozrakhunku [Machines for earthworks. Calculation examples]. Kyiv: ISDO, KNUBA, 304. (in Ukrainian).
10. **Pelevin L. Ye., Prystailo M. O.** (2012). Obgruntuvannia vyboru heometrychnykh ta dynamichnykh parametriv modeliuvannia rizannia ґрунту nakonechnykom z konsolliu [Choice justification of geometric and dynamic parameters for modeling soil cutting with cantilever tip]. Tekhnika budivnytstva, (28), 70–75. (in Ukrainian).
11. **Pochka K., Prystailo M., Delembovskyi M., Balaka M., Maksymiuk Y., Polishchuk A.** (2025). Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Karpenko M., Stosiak M. (eds) TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham, 557–565. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85390-6_52.
12. **Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M.** (2025). Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 4(1), 79–92. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjca.20250401.07>.
13. **Pelevin L. Ye., Balaka M. M., Prystailo M. O., Machyshyn H. M., Arzhaiev H. O.** (2015). Teoretychni osnovy vzaiemodii pruzhno-deformovanykh vykonavchykh elementiv budivelnoi tekhniki i robochoho seredovyscha z vrakhuvanniam termoreolohichnykh protsesiv [Interaction theoretical foundations of elastically deformed actuating elements for construction equipment and working environment taking into account thermorheological processes]: monograph. Kyiv, 232. (in Ukrainian).
14. **Prystailo M. O.** (2014). Obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv rozpushnykai kailuvalnyka z pruzhno-deformovanykh vykonavchym elementom [Justification of rational parameters of tiller-soiler with elastically deformed executive element]: Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.05.04 – Machines for earthmoving, road and forestry works. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, 161. (in Ukrainian).

Methodology for conducting laboratory studies of soil cutting with a deformer with a cutting edge on a pneumatic accumulator

*Mykola Prystaylo, Andriy Polishchuk,
Ihor Gonta*

Abstract. The paper presents a methodology for laboratory research into the process of soil cutting by a deformer with a cutting edge kinematically connected to a pneumatic accumulator. Paraffin was used as a soil model, which allows optical detection of stressed zones using polarization analysis. The design of the laboratory setup, deformer and pneumatic accumulator, the sequence of preparation of the paraffin model, the methodology for conducting experiments, as well as the algorithm for

processing experimental data are described. Generalized regression relationships are proposed to describe the influence of the depth of immersion, the speed of the deformer movement, and the pressure in the pneumatic accumulator on the cutting force and specific energy consumption. A verbal description of typical dependence graphs and examples of regression equations are given. It is shown that the use of a cutting edge on a pneumatic accumulator allows to reduce the peak values of the cutting force and to disperse the stresses in the soil model.

Keywords: soil cutting, paraffin model, physical modeling, cutting edge, pneumatic accumulator, energy-power parameters, regression, optical visualization.

Methodology for determining the parameters of a belt-type formwork module for vertical reinforced concrete structures

Volodymyr Rashkivskiy¹, Oleksandr Makhynia², Iryna Dubovyk³, Yuri Zaiets⁴

^{1, 2, 3, 4} Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitrianych Syl, Kyiv, Ukraine, 03037

¹rashkivskiy.vp@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-5369-6676>,

²makhynia.om@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7167-2857>,

³duvovyk.iv@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7444-9159>,

⁴zaiets_yv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1824-0427>

Received: 11.10.2025, accepted: 23.11.2025

<https://doi.org/10.32347/st.2025.4.1901>

Abstract. The article presents a comprehensive methodology for determining, analysing, and optimizing the parameters of a belt-type formwork module used for constructing vertical reinforced-concrete elements within group mechanized systems. Particular attention is given to the mechanics of interaction between the flexible forming belt and early-age concrete, where the key factor is the tangential separation force governed by the roller diameter, belt width, module height, temperature regime, and concrete strength development kinetics. The proposed analytical model demonstrates that the localized tangential detachment zone formed during module lifting significantly reduces energy consumption, minimizes peak loads on the concrete surface, and decreases the likelihood of defects—advantages that distinctly differentiate belt-type systems from traditional panel formwork.

A mathematical model of the technological flow for a set of formwork modules was developed using mixed-integer linear programming (MILP). This model enables optimization of lifting frequency, the number of active modules, rational roller diameters, and concrete placing intervals while considering production constraints and environmental effects. Variational and statistical simulations, incorporating temperature fluctuations, concrete grades, rheological changes, and stochastic deviations of the technological process, confirmed the system's stable performance under various operating conditions. The graphical results demonstrate a potential 18–35% reduction in concreting duration, a 2–4-fold decrease in separation forces, and a notable increase in formwork turnover.

The findings form a scientific basis for designing next-generation mechanized formwork complexes capable of ensuring higher productivity, improved forming quality, and enhanced adaptability to external conditions. The proposed methodology



Volodymyr Rashkivskiy

Head of dep. Construction Machinery Kyiv National University of Construction and Architecture, PhD, associate prof



Oleksandr Makhynia

associate prof of dep. Construction Technology, Kyiv National University of Construction and Architecture, PhD



Iryna Dubovyk

Kyiv National University of Construction and Architecture, Engineer



Yuri Zaiets

Kyiv National University of Construction and Architecture, p.graduate student

also creates prerequisites for the development of digital twins of construction processes, the implementation of SCADA-based automated monitoring, and the integration of BIM solutions into the control architecture of group belt-type formwork modules.

Keywords: group formwork modules, belt formwork, panel formwork, tangential separation, formwork roller, monolithic pylons, technological cycle, optimization, MILP, BIM, SCADA,

monolithic construction technology, concrete hardening, automation of formwork systems.

INTRODUCTION

Modern monolithic construction technologies are characterized by increasing requirements for productivity, controllability and accuracy of the processes of forming vertical reinforced concrete structures. The use of traditional panel formwork systems is accompanied by significant labor costs, high tear-off forces, limitations on the speed of reuse, as well as dependence on climatic conditions and the intensity of concrete hardening.

In response to these challenges, technologies of group mobile formwork modules are actively developing. These systems enable cyclic and safe formation of pylons based on a modular principle. A key feature of such systems is the use of a flexible forming element that detaches tangentially from the concrete surface at the lower part of the module. This fundamentally changes the mechanics of the formwork–concrete interaction, reduces energy consumption, improves surface quality, and increases formwork turnover.

However, until now there has been no scientifically grounded methodology for determining the optimal roller diameter—an essential component of the module that governs:

- the detachment force of the belt from the concrete surface;
- allowable limits of lifting acceleration;
- the quality of the formed concrete surface;
- technological stability of the cycle with varying temperatures and hardening rates.

To ensure safe and automated operation of modules, it is necessary to develop a scientifically sound approach that would take into account:

- the physics of forming tape bending;
- lifting kinematics;
- dependence of concrete strength on temperature;
- adhesion characteristics of the surface;
- production variability of conditions (through statistical modeling).

All these factors substantiate the relevance of this study and confirm the need for a unified methodology to determine the parameters of mobile formwork modules.

Goal To develop a comprehensive engineering methodology for determining the optimal roller diameter of the forming element in modular vertical formwork, taking into account temperature conditions, concrete hardening parameters, geometric characteristics of the formwork, and requirements for minimizing detachment forces.

To achieve the set goal, the following scientific and technical tasks were formulated and solved in the work:

1. Analytical modeling of detachment force.
2. Consideration of temperature conditions and hardening kinetics.
3. Statistical modeling.
4. Comparative analysis of modular and panel formwork.
5. Integration of the methodology into the optimization process.

THE PURPOSE OF THE WORK

The object is a technological process of forming vertical monolithic structures using group mobile formwork modules.

The subject is the mechanics of detachment of the flexible forming element and the parameters of the roller system ensuring minimal energy load under stable concreting cycles.

The study employs:

- analytical modeling of the tear force through the energy equations of bending and adhesion;
- mechanics of composite tapes to determine the effect of R on the curvature $\kappa = 1/R$;
- early-age concrete strength models (time – temperature maturity);
- statistical modeling (Monte Carlo) with 10^4 scenarios;
- numerical optimization (for different temperatures);
- comparative structural and mechanical analysis of modular and panel formwork;

- technological analysis of the impact of optimal R on the rate and turnover of formwork.

Traditional panel formwork systems (Fig. 1, a) are the most common means of forming vertical monolithic structures in civil and industrial construction. Their design scheme is based on the use of rigid frame or plywood - steel panels, which are installed on the design geometry using spacers, tie elements and fasteners. The formation of the concrete surface occurs under conditions of complete compression of the concrete by the panel over the entire height of the structure. After the concrete hardens, the formwork is dismantled, cleaned and moved by crane or manual means to the next grab.

A characteristic technological feature of panel systems is the vertical tear-off force that occurs along the entire height of the panel (2–3 m). During dismantling, there is a significant bending of the panel and an uneven distribution of adhesive forces, which requires the application of a noticeable force manually or using crane equipment. This can lead to defects in the concrete surface, local delamination or damage to the edges. In addition, the panel system has limited turnover, significant weight, high labor intensity of assembly and disassembly operations and dependence on the rate of hardening of the concrete, which makes it difficult to accelerate the concreting cycle.

In contrast, the belt-type modular formwork proposed in this study (Fig. 1b) is a new technological solution based on the use of a flexible forming element (formwork belt) that moves around supporting rollers. During the module's ascent, the belt detaches tangentially from the concrete surface at the lower part of the formwork, creating a localized detachment zone whose radius is determined by the roller diameter.

Such a scheme fundamentally changes the mechanics of the process:

- the separation zone is small (5–12 cm), unlike 2–3 m in panel formwork;

- the separation occurs smoothly and evenly, with minimal effort;
- the bending of the tape compensates for contact adhesion, reducing energy consumption;
- the quality of the concrete surface is improved due to the absence of sharp tear-off pulses;
- reduces dependence on manual operations and the need for a crane;
- Formwork turnover increases and overall concreting cycles are reduced.

The belt system technologically better meets the requirements of continuous and sequential mechanization, allows for the formation of vertical structures with overlaps and integrates with automated lifting mechanisms. This makes it promising for use in group modular complexes capable of providing high productivity in multi-storey buildings, especially with the modular principle of construction.

The structure of the process of concreting a vertical structure with a belt-type modular formwork is given in Table 1.

Therefore, to determine the parameters of the belt-type modular formwork, we will define the force of separation of the belt-type from the placed concrete as the determining factor [1-6].

In the first stage, we will find the optimal radius R (or diameter $D = 2R$ formwork roller, in which:

- the force required to tear the tape off the concrete surface $F(R, t)$ is minimal (or has a sufficient safety margin),
- at the same time, technological requirements are met (allowable lifting time t_{lift} , permissible cycles, module dimensions),
- The dependence of the adhesion of the separation on the degree of hardening of the concrete $f_c(t)$, which depends on the temperature (maturity method), is taken into account.

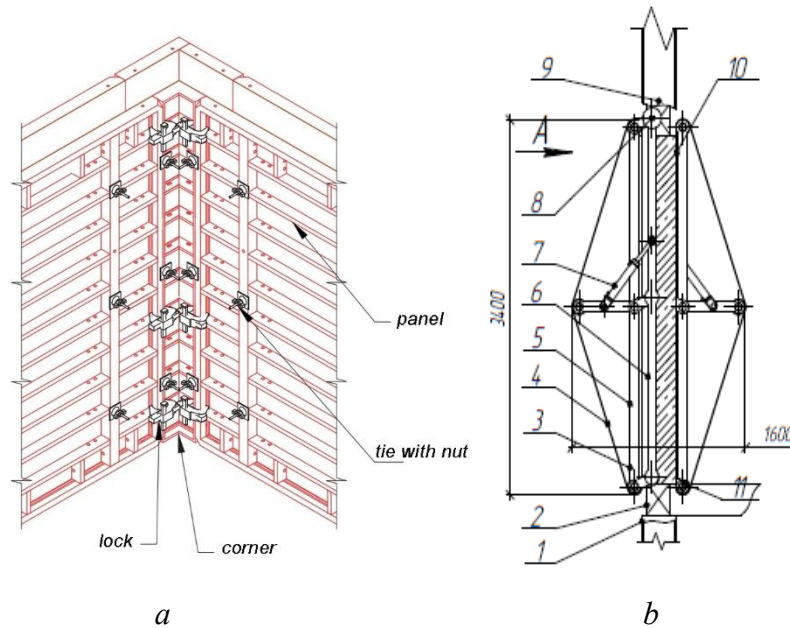


Fig. 1. Technological equipment for monolithic concreting: *a* – panel formwork [7] ; *b* – belt-type modular formwork [8]

Table 1. Structure of the process of concreting a vertical structure with a belt-type modular formwork

Code	Name process	Characteristic	Medium labor intensity man-hours
O1	Installation of the guide frame	Installation guides elements, check verticality	2.23
O2	Installation modules	Fastening on anchor supports, connection hydraulic systems	1.95
O3	Reinforcement sections	Stacking fittings inspection position	3.10
O4	Concreting	Mixture feeding, vibration, compaction control	0.58 per 1 m ³
O5	Exposure and curing control	Preparing for the climb	0.40
O6	Module lift	Hydraulic drive operation, synchronism control	0.88
O7	Self-cleaning ribbons	Cleaning from sticking tension check	0.25
O8	Regulation parameters	Adjustment widths pylon, angle of inclination	0.30
O9	Dismantling the system	Disconnection modules, moving to a new one	1.85

Approach: energy/mechanical — we use the classical division into two component separation forces:

1. the energy of adhesion failure of the concrete-tape bond (adhesive part),

which increases with the age of the concrete;

2. the contribution of the bending of the tape around the roller (the bending component), which increases with decreasing *R*.

The total tear force per unit width (*N/m*) is approximately:

$$p(R, t) = \Phi(\theta) + (G_C(t) + \frac{B}{2R^2}),$$

where $G_C(t)$ — the fracture energy per unit width (J/m^2) depends on the age and curing temperature of the concrete; B — the bending stiffness of the tape ($N \cdot m$); $\Phi(\theta) = \frac{1}{1 - \cos \theta}$ — the correction factor for the contact angle (takes into account that the separation occurs at a certain angle of rotation. Total force: $F(R, t) = p(R, t) \cdot W$,

where W is the width of the belt-type modular formwork (m).

Methodology parameters

Required:

- W — width of the belt / forming surface (m).
- H — formwork height (m) or module height.

- t — time from pouring to the moment of separation / lifting (hours).
- $T(\tau)$ — temperature regime of concrete ($^{\circ}\text{C}$) as a function of time.
- R_{max}, R_{min} — permissible limits of the roller radius according to the design.
- F_{max} — maximum available tear-off force of the mechanism, N.
- f_{c28} — design grade compressive strength of concrete at 28 days, MPa.

Material /design parameters:

- E_t, ν_t is the elastic modulus of the tape material and Poisson's ratio.
- t_t — tape thickness, m.
- θ — contact angle (radians). For “tangential” contact, $30^{\circ} \dots 60^{\circ}$.
- Communication parameters k_g, α for the function $G(t)$.

Nominal technological:

- t_{reg} — desired time to rise (maximum), hours.
- f_{reg} — minimum concrete strength for safe lifting/loading, MPa.

To take into account the temperature effect, we use the maturity method (Nurse – Saul).

Maturity level:

$$M(t) = \sum_{i=1}^n (T_i - T_0) \Delta t_i,$$

where T_i is the average temperature of concrete in the interval Δt_i , $^{\circ}\text{C}$; T_0 — base temperature, $^{\circ}\text{C}$.

Let us denote it M_{28} as the measure of maturity at 28 days under standard conditions.

The relationship between strength and maturity, empirical relationship [9-18]:

$$f_c(t) = f_{c28} \left(\frac{M(t)}{M_{28}} \right)^{\beta},$$

where β is the exponent (usually (0,4)–(0,8), for ordinary concretes about (0,5).

In the absence of real temperature data, a simple time approximation can be used [9-18]:

$$f_c(t) = f_{c28} \frac{t}{t+a},$$

where a is an empirical parameter (hours or days).

The maturity method makes it possible to link the temperature in the hardening mode with the rate of strength gain - this is the basis for determining the moment of safe lifting in various weather conditions.

The fracture energy when the tape is pulled away from the concrete surface G_C (unit: J/m^2) correlates with the tensile/rupture strength of the concrete (e.g., ideal tensile strength f_t).

Let's assume:

$$G_C(t) = k_g \cdot f_t(t) \cdot \delta_c,$$

where

- $f_t(t)$ — tensile strength of concrete (MPa) at the moment t (can be calculated from $f_c(t)$ the empirical dependence),
- δ_c — characteristic displacement (delamination) upon adhesion failure (m) — experimental parameter of order $10^{-5} - 10^{-3} \text{m}$,
- k_g — coefficient that takes into account the surface type, roughness, and external adhesion conditions.

It is practically convenient to use the proportion (empirical) [14]:

$$f_t(t) \approx c_t f_c(t)^{\gamma},$$

where c_t and γ are empirical constants (for example, for most concretes $f_t(t) \approx 0,1 f_c$).

The tape has a bending stiffness per unit width [9-18]:

$$B = \frac{E_t t_t^3}{12(1-\nu_t^2)},$$

unit: N m (per 1 m width). Here E_t is the elastic modulus of the tape, t_t is the tape thickness in m, ν_t and is the Poisson's ratio of the tape.

The effect of bending on the energy of separation (per unit width) is approximately:

$$E_{band}(R) \approx \frac{B}{2R}.$$

This shows a rapid increase in the energy component as (R) decreases.

If the tape bends at an angle θ at the beginning of the tear, then its geometry coefficient is determined by [9-18]:

$$\Phi(\theta) = \frac{1}{1 - \cos \theta}$$

When $\theta \rightarrow 0$ this factor is large (a certain conservatism), when it $\theta = \pi$ is exactly 1/2. In practice, the value θ is chosen based on the actual contact profile (typically $(30^\circ - 90^\circ)$). If the system is “tangential” (small θ), Φ it increases significantly p : the separation becomes more energy-intensive.

Tearing force per unit width:

$$p(R, t) = \Phi(\theta) \left(G_c(t) + \frac{B}{2R} \right), N/m.$$

Total tear-off force:

$$F(R, t) = p(R, t)W, N.$$

Assumption: we neglect the friction of the tape on the surface of the pressure plate.

When selecting R , the following two conditions must be satisfied:

1. Concrete strength sufficient for lifting/loading (design limit):

$$f_c(t_{lift}) \geq f_{req}$$

2. Mechanical capacity of the mechanism lifting: the breakaway force must not exceed the available capabilities:

$$F(R, t_{lift}) \leq F_{act.max}$$

Also, a safety margin condition is desirable S :

$$S = \frac{F_{act.max}}{F(R, t_{lift})} \geq S_{req}$$

$$S_{req} = 1,2 \dots 1,5.$$

Let t_{lift} be the estimated lifting time (depends on the organization of work and the ambient temperature [1-4]). We are looking for $R \in [R_{min}, R_{max}]$, which satisfies the constraint and optimizes the criterion. Possible options for the objective function:

Option A — minimizing the pull-off force:

$$\min_{R_{min} \leq R \leq R_{max}} F(R, t_{lift}),$$

under restrictions:

$$f_c(t_{lift}) \geq f_{req}, F(R, t_{lift}) \leq F_{act.max}$$

Option B — minimizing cycle time under force limitation (adaptation): choose the minimum t_{lift} (i.e., faster rise) provided that there exists R such that $F(R, t_{lift}) \leq F_{act.max}$. Here R can be an arbitrary parameter or a given one.

Option C — multi-criteria optimization: minimize the total indicator $\alpha \cdot T_{prod} + \beta \frac{F}{F_{act.max}}$, where T_{prod} — technological time (depends on t_{lift} , and α, β — weighting factors).

In a simple implementation, we note analytically: $F(R, t)$ decreases with increasing R through $B/2R^2$ — hence from the point of view of the bending component it is better to choose the largest possible R , but design constraints and the influence on $G_c(t)$ (due to increased contact) may change the solution.

In panel formwork, the separation is performed normally to the entire area (height 2–3 m), and the separation force acts over the entire contact surface.

We assume that the force is determined by the adhesion energy per area $S = W \cdot HS$, and the effective “arm” of separation is proportional to $H/2$:

$$F_{sh}(H, t, T, W) = \alpha G_c(t, T)WH,$$

where $\alpha \approx 1.5 - 2.0$ is the correction factor for the non-ideality of separation (due to uneven adhesion).

The implementation of the methodology was performed in Python for: panel and strip formwork, strip width 1, 1,2, 1,5 1,8; panel and module height up to 1,6 m, 2 m, 3 m; strip material – rubber; panel material – metal; formwork module width 1,2 m, concrete hardening temperature 10, 20, 30°C.

The graphical results presented in the methodology demonstrate the typical nonlinear

behavior of the pull-out force $F(R)$ for the strip surface of the formwork (Fig. 2-5).

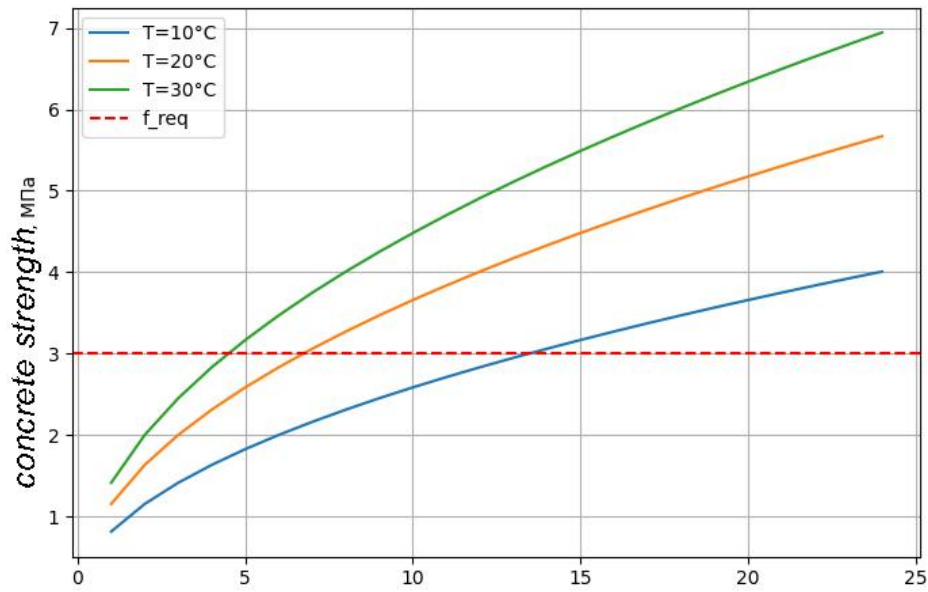


Fig. 2. Graphical representation of the development of concrete strength as different ambient temperatures

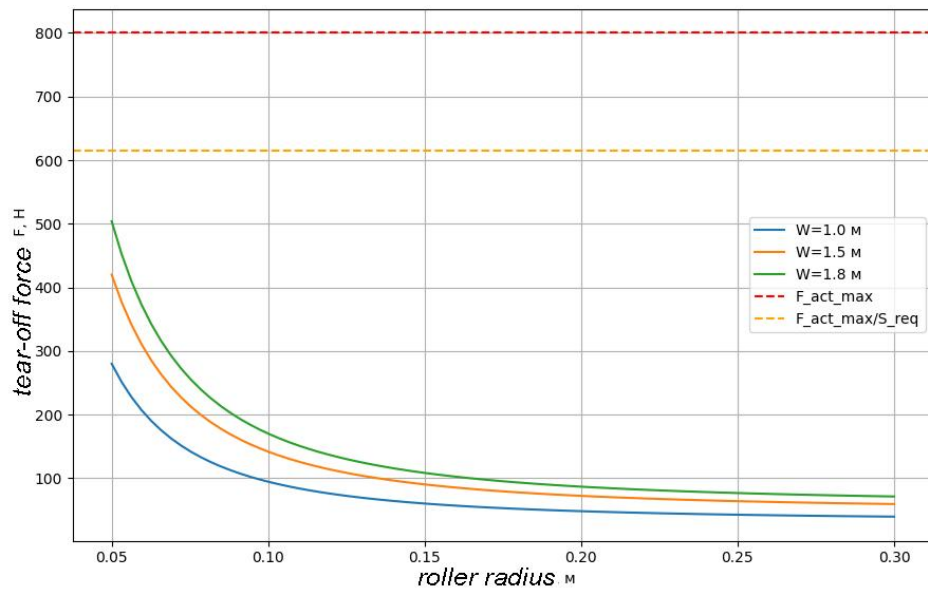


Fig. 3. Graphical representation of the change in the tear-off force of the formwork module tape when changing the concreting width for 20 °C.

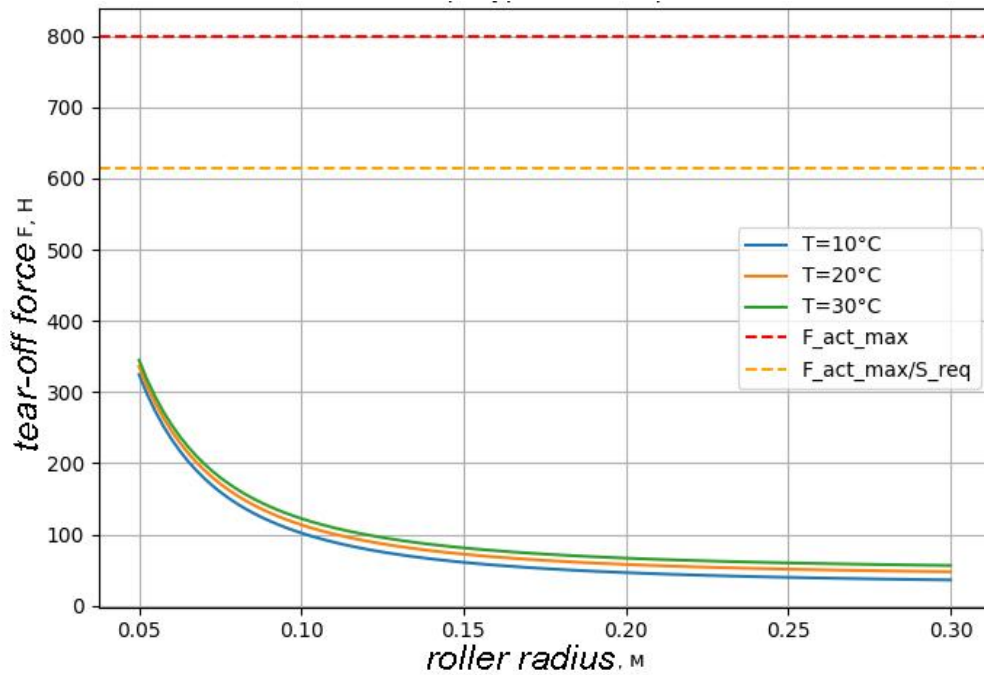


Fig. 4. Graphical representation of the change in the tear-off force of the formwork module of the shield when the ambient temperature changes for a module width of 1.6 m, a displacement time of 8 h.

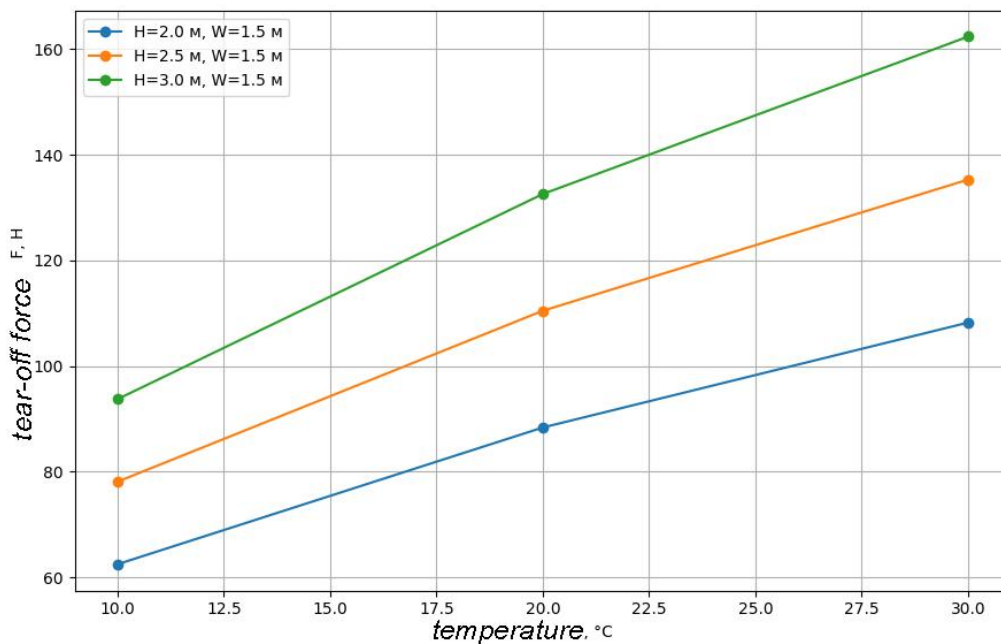


Fig. 5. Graphical representation of the change in the formwork shield separation force when changing the concreting height for 20°C

The graphical results presented in the methodology demonstrate the typical nonlinear behavior of the pull-out force $F(R)$ for the strip surface of the formwork.

When the roller radius R decreases, the separation force is:

- increases sharply for $R < 200\text{--}250\text{ mm}$,
- moderately decreases with increasing R to $300\text{--}400\text{ mm}$,

- approaches the asymptotic region for $R > 450\text{--}500\text{ mm}$.

With a small value of the roller radius, the tape must bend under a much larger curvature, which: increases the bending resistance moment, increases the energy component of the separation, and creates a peak contact stress in the lower zone of the concrete.

The graph of the $R_{opt}(T)$ dependence shows a monotonic decrease in the optimal R with increasing temperature.

That is, at high temperatures, concrete gains strength faster, respectively, the adhesion component $G_p(t)$ increases, and the permissible F_{max} is not achieved even at lower R .

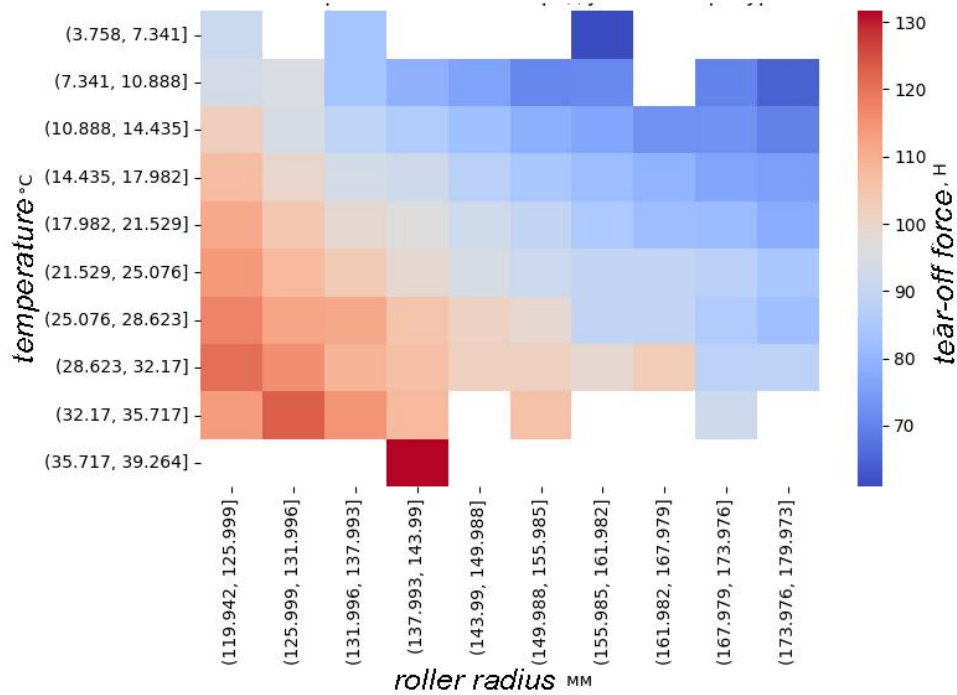


Fig. 6. Monte Carlo simulation of the minimization of the tear-off force

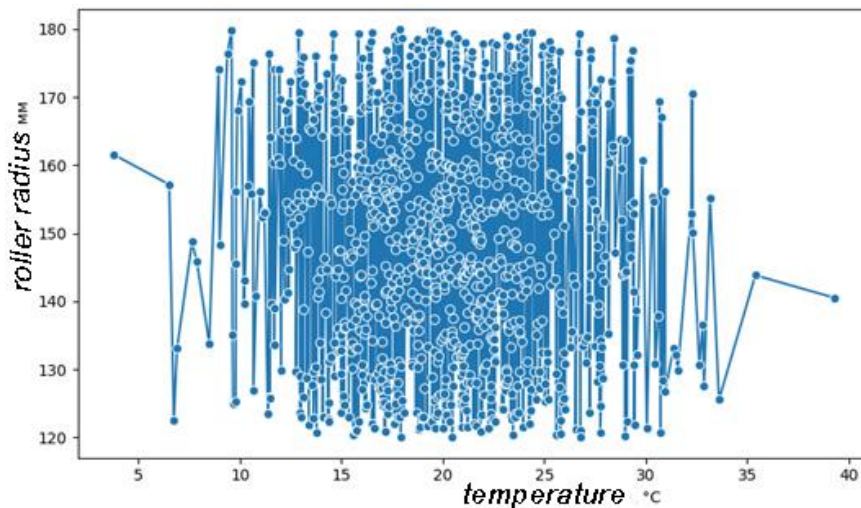


Fig. 7. Monte Carlo simulation of the dependence of the optimal belt roller radius on ambient temperature

Used in the methodology for estimating uncertainties allows us to determine: the randomness of temperature fluctuations $\pm 5 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$; variations in concrete strength at an early age; possible deviations of the tape thickness $\pm 10\%$; errors in measuring the contact angle θ (Fig. 6,7).

In the diagram (Fig. 7), a «cloud» of $F(R)$ scenarios can be observed: for small R (100–150 mm), there is high dispersion — indicating

system instability; for $R > 300$ mm, the curve stabilizes and the spread of scenarios decreases. Such analysis shows the reliability of the solution when changing hardening conditions, allows you to choose a diameter with the maximum technological margin, and allows you to design equipment for the “worst case scenario.” Therefore, the range $R = 300\text{--}450$ mm demonstrates the minimum risk of increasing tear-off forces.

CONCLUSIONS

the obtained analytical data show a radical difference in the mechanics of separation: for modular strip formwork, the separation zone is local, in the lower part, the “shoulder” of the separation force is minimal (depends on the radius of the roller), the value of the force F is 70–150 N. For panel formwork, separation occurs along the entire height of the panel (2–3 m), the “shoulder” of the force is $H/2$ (tens of times larger), F is 400–700 N, i.e. 3–8 times larger.

Therefore, panel formwork has linearly increasing forces with height, while in a modular system the forces act pointwise and for a short time - therefore the formwork removal process is "soft", does not disturb the concrete surface, allows for early lifting, and is less critical to adhesion heterogeneity.

Graphical dependencies confirm that the optimal roller diameter is not just a design parameter, but a critical element of technological safety and efficiency of mobile modular formwork. This parameter is influenced by a combination of: temperature conditions, concrete hardening dynamics, belt bending mechanics, roller geometry, and lifting mechanism features.

REFERENCES

1. **Tonkacheev G, Molodid OS and others** (2024). Innovative technologies of frame construction. *Study guide*. Kyiv. Lira. 315.
2. **Tonkacheev G.** (2012). Functional-modular system of formation of construction equipment sets. monograph. 300.
3. **Sharapa S.P., Tonkacheiev H.M., Lepska L.A.** (2020). Methodology of construction technology. *Education manual*. Kyiv, KNUCA, 220. (in Ukrainian).
4. **Rashkivskiy V., Dubovyk I., & Zaiets Y.** (2023). Development of an information model of the mechanized construction process of vertical constructions. *Girnichy, Budivel's, Dorozhnii Ta meliorativni Mashini*, (101), 36–43. <https://doi.org/10.32347/gbdmm.2023.101.0303>
5. **Tonkacheiev H., Ignatenko O., Rashkivskiy V., Dubovyk I., Tryhub A., Sobko Yu.** (2024). Development of the technology of crane-less lifting of long-span reinforced concrete and metal coatings. *AD ALTA. Journal of Interdisciplinary Research* (14/01-XL.), 271–275. <https://doi.org/10.33543/j.140140.271275>
6. **Tonkacheev G., Rashkivskiy V., Rudnieva I., Dubovyk I.** (2023). Investigation of labor intensity and duration of the assembly processes of structural covering blocks. *Strength of Materials and Theory of Structures*, No.110. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.110.393-403
7. **Panel formwork for walls and columns.** URL : <https://budhub.in.ua/blog/shchytova-opalubka-z-choho-skladajetsia-osoblyvosti-system>
8. **Tonkacheev G. and others** (2014). Vertically movable formwork. Patent of Ukraine No. 94543 U. Bul . No.22, 25.11.2014.
9. **Nicholas J. Carino , Hai S. Lew.** (2001). The Maturity Method : From Theory this Application. *Structures Congress & Exposition, ASCE*. DOI: 10.1061/40558(2001)17. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860356
10. **L. Wang and al.** (2023). Prediction of concrete strength considering thermal history and maturity method. *Construction and Building Materials*, Vol. 408. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823024959>
11. **I. Galobardes.** (2015). Maturity method this predict the evolution of the properties of fresh "Concrete." *Construction and Building Materials*, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814013403>
12. **J Y Zhang.** (2008). New perspectives of maturity method and innovative approach this early age concrete strength prediction .” *Canadian publication*, URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=6a23ae64-1437-4893-bbcd-50a33d78769c>
13. **GS Ryu et al.** (2024). Evaluation of Concrete Compressive Strength Prediction Using the Maturity Method Incorporating Various Curing Temperatures and Binder Compositions .” *Materials*, URL : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11642691/>
14. **Peng X. and al.** (2022). Predictive Modeling of Compressive Strength for Concrete at Very Early Age” *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-022-08693-0. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9320757/>
15. **Xu Y. and al.** (2020). Compressive Strength Gain Behavior and Prediction of Durable Performance for Cement-Stabilized Macadam in Low Temperature Regions.” *Journal of Materials*, DOI: 10.1155/2020/2469436. URL:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/2469436>

16. **Olar A.** (2004). Implementation of the Maturity Method for Zero Slump Concrete Products.” PCI Journal, URL: https://www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/2004/March-April/Implementation_of_the_Maturity_Method_for_Zero-Slump_Concrete_Products.aspx (pci.org)
17. **Aydin Shishegaran and al.** (2020). High correlated variables creator machine : Prediction of the compressive strength of concrete .” arXiv preprint, URL: <https://arxiv.org/abs/2009.06421>
18. **Hossein Moayedi and al.** (2021). Analyzing Uniaxial Compressive Strength of Concrete Using a Novel Satin Bowerbird Optimizer .” arXiv preprint. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.15547>

Методика визначення параметрів стрічкового опалубного модуля для будівельних вертикальних залізобетонних конструкцій

Володимир Рашиківський¹, Олександр Махиня²,
Грина Дубовик³, Юрій Засць⁴

^{1,2,3,4} Київський національний університет
будівництва і архітектури

Анотація. У статті представлено розгорнуту методику визначення, аналізу та оптимізації параметрів стрічкового опалубного модуля, що застосовується для формування вертикальних залізобетонних конструкцій у складі групових механізованих систем. Особливу увагу приділено механіці взаємодії гнучкої формувальної стрічки з бетоном на ранніх стадіях твердіння, де ключовим фактором є дотичне відривне зусилля, яке залежить від діаметра та конфігурації роликової системи, ширини стрічки, висоти мо-

дуля, температурного режиму та кінетики набору міцності. Запропонована модель демонструє, що локалізована зона тангенціального відокремлення стрічки забезпечує суттєве зниження енерговитрат, мінімізацію пікових навантажень на бетон і зменшення ймовірності дефектів поверхні, що вигідно вирізняє стрічкову опалубку серед традиційних щитових систем.

Створено математичну модель технологічного потоку комплексу модулів на основі змішаного цілочислового лінійного програмування (MILP), яка дозволяє визначати оптимальні параметри частоти підйому, кількості модулів у роботі, раціональних діаметрів роликів та часових інтервалів бетонування відповідно до виробничих і технологічних обмежень. Варіаційні та статистичні розрахунки, виконані з урахуванням температурних коливань, марок бетону, реологічних змін і стохастичних відхилень процесу, підтвердили можливість стабільного функціонування системи за різних умов. Графічні залежності демонструють потенційне скорочення тривалості бетонування на 18–35 %, зниження відривних зусиль у 2–4 рази та підвищення оборотності формувальних модулів.

Результати дослідження становлять наукове підґрунтя для проєктування механізованих опалубних комплексів нового покоління, що здатні забезпечити підвищену продуктивність, якість формування та адаптивність до зовнішніх умов. Запропонована методика також створює передумови для побудови цифрових двійників технологічних процесів, впровадження систем автоматизованого моніторингу SCADA та інтеграції BIM-рішень у процес керування груповими стрічковими модулями.

Ключові слова: груповий опалубний модуль, стрічкова опалубка; щитова опалубка; дотичний відрив; ролик опалубки; монолітні пілони; технологічний цикл; оптимізація; MILP; BIM; SCADA; технологія монолітного будівництва; твердіння бетону; автоматизація опалубних систем.

GUIDELINES FOR AUTHORS

Publication requirements

For publication in the *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering* journal are accepted original materials of the research and discussion character (mostly individual, in English, the number of authors not more than three) in volume of 8 – 12 pages (A4), including tables, drawings and a list of literature. The Articles (mostly individual, in English, no more than 3 authors and no less than 20 sources) are subject to double review, including by independent specialists engaged by the editors, and DOI digital identification. The authors submit to the publisher the copyright to texts and written permissions to reproduce drawings and tables from previously unpublished or copyrighted materials. The editorial board follows the ethical standards of scientific publication.

To the article attached (cybersec@knuba.edu.ua) **Application** for publication (7 files collected in the "Documents" folder):

- 1) information **about the article** – *Form 1*
- 1) information **about the authors** (status: *h-index*, last name, first name, patronymic, degree, academic rank, place of work, address, post; contacts: photo of the author (.jpg), mobile phone, e-mail, ORCID identifiers and Scopus Author ID) – *Form 2* (word)
- 2) two external **reviews** – *Form 3*
- 3) expert **conclusion** – *Form 4*
- 4) **agreement** on the free use of copyright – *Form 5*
- 5) certified **translation** of the article into English
- 6) **recommendation** for printing (extract from the protocol of the institution where the author works)

Requirements to the article

Terms:

- sheet parameters: A4 format, upper and lower fields 2,5 cm, left and right 2 cm; font Times New Roman; footers 1,0 cm, paragraph indentation 0,5 cm; the size of the main text 12, annotations and literature 11, line spacing 1
- the article (.doc) is formatted in two columns of 8 cm with a gap of 1 cm; set up automatic word transfer
- the names of the tables and signatures under the drawings (size 11) are placed on the left of the graphic object; in Cyrillic texts – duplicate in English (line below)
- in the list of references – not less than 20 references (mainly on scientific articles and monographs); after the surname the year of publication is indicated (APA standard)
- the list of references is duplicated in English (verbatim), while the original data is transliterated (<https://translit.kh.ua/#lat>), indicating in brackets the original language, for example (in Ukrainian), (in Poland), (in English)
- referring to the Internet resource, the full name and the source data of the publication should be indicated
- at the end of the English-language articles the annotation is given in Ukrainian; in other articles – in English

Structuring:

- source data (font Arial): title of the work (n/a, font 14), author's first and last name (italics, font 12), place of work, postal address, e-mail, ORCID (font 10); if there are several authors – they are marked with digital footnotes; 5 empty lines is left between the upper field of the page, the source data and the main text of the article
- structural subdivisions:

<i>Article</i> (8 – 12 pp. font 12): <ul style="list-style-type: none">- ANNOTATION- INTRODUCTION- PURPOSE AND METHODS- RESULTS AND EXPLANATIONS- CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS- ACKNOWLEDGMENT (if necessary)- REFERENCES (not less than 20 references)	<i>Annotation:</i> (not less than 1800 characters – 0,5 pp. font 11) <ul style="list-style-type: none">- PURPOSE- METHODOLOGY- RESULTS OF THE RESEARCH- SCIENTIFIC NOVELTY- PRACTICAL SIGNIFICANCE- KEYWORDS (5 – 8 words)
--	--

- title of the article – informative and short; the annotation structure is similar to the structure of the article, without the use of shortenings and abbreviations, all explanations are given in the text; link – no more than 5 sources in one place
- tables and figures are placed after the first mention of them, large (full width of the sheet) – from the top or bottom of the page (without breaking the two columns of the text simultaneously)
- Illustrations – in .jpg, .tif format with the resolution of at least 300 dpi

Design:

- write straight: numbers, Greek letters, Cyrillic alphabet, trigonometric functions (tan, sin, etc.), fixed expressions (max, const, etc.), chemical elements; italics – English formula symbols, Roman numerals, exploration numbers
- between formulas, drawings, tables and text leave 1 empty line
- formulas (size 12-9-7-16-12) are typed in MathType and centered; numbering – to the right of the column; tables and figures – do not exceed the area printed sheet
- shortened words "Table", "Fig." are written with capital letter (in the text – light, in the name – n/a); The text in the drawing field is minimized, explanations are given in the signatures under the drawings
- as punctuation marks only a point and a comma are used (standard ARA); the number of pages (range) is indicated without their designation
- examples of article design and archive of journals – see <http://uwtech.knuba.edu.ua>

Publication statement
in an international scientific journal

(journal name)

Form 1

INFORMATION ABOUT THE ARTICLE

Language of the article	Author(s) (name, surname – <i>in the language of the article</i>) (subject area) / (number of pages)	Documents (+/-)							Article Title Reviewers (name, surname, scientific degree, academic status – <i>in the language of the article</i>)	Order (number of copies)
		About the article (F.1) 1	About the authors (F.2) 2	Two reviews (F.3) 3	Exp. conclusion (F.4) 4	Agreement (F.5) 5	Approved Translation 6	Recommendation 7		
										Signature
								Rev.1: Rev.2:		

Form 2

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
(*in the language of the article*)

Data			Contacts	
h-index (Scopus)	Full Name scientific degree, academic status	Place of work, position, address, index	The author's photo (.jpg, 300 dpi)	Cell-phone e-mail ORCID Scopus Author ID Researcher ID

* – indicate availability by sign

REVIEW
(two, external)

Must contain:

- 1) *Title of the article, Surname of the author(s)*
- 2) *Evaluation of the work* (originality, correspondence with the title and text of the article, methods and purpose of work, terminology, style of presentation, grammar)
- 3) Information about *the Quality of the article* (content, translation in English) and the lack of *Plagiarism*
- 4) *Remarks and Adjustments* (or indication of the necessity to transfer the article to another reviewer)
- 5) *Recommendation* (for publication, further elaboration, re-review, refusal to publish)
- 6) Information about the *Reviewer* (name, surname, degree, academic rank, place of work in the language of the article)
- 7) *Date, Signature* (approved)

(Sample)

APPROVED

(position, scientific degree,
academic status)

Full Name

« ____ » _____ 202 ____

EXPERT CONCLUSION No ____

on the possibility of publishing materials
in the press and other sources of information

Kyiv National University of Construction and Architecture Expert Commission, having reviewed the materials

(name, surname of the author(s))

(Article Title)

which consists of ____ pages, notes that they do not have any information that would be a subject to publication ban in accordance with "The Expanded list of information containing the state secret in the Ministry of Education and Science of Ukraine – 2001"

Conclusion: these materials are allowed to be published openly

The Head of the Expert Group

Full Name

AGREEMENT No _____

on free use of copyright in the *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering* periodical Edition

Kyiv

« ____ » _____ 20 ____

The Editorial Board of the *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering* journal, the founder of which is the Kyiv National University of Construction and Architecture, having the legal address: KNUCA, Povitrianykh Syl Ave, 31, Kyiv, Ukraine, 03037, in the person of the chief editor, doctor of technical sciences, professor M. Sukach, on the one hand (hereinafter – Editorial), and the owner(s) of the property rights and copyright in the person of

_____	_____	_____
(Full Name)	(scientific degree, academic status).....	(ORCID)
_____	_____	_____
(Full Name)	(scientific degree, academic status).....	(ORCID)
_____	_____	_____
(Full Name)	(scientific degree, academic status).....	(ORCID)

on the other hand (hereinafter – the Author(s)), who altogether referred to as the Parties, guided by the Civil Code, the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights", other legislative and regulatory acts of Ukraine, entered into this Agreement as follows.

§ 1

1.1. The author (s) declare that they are valid writers of the Scientific Work / Article titled as

(original language)

which is the result of their joint creative work and that they have the exclusive copyright in relation to the above mentioned work.

1.2. The author (s) declare that the Work/Article does not violate the copyrights of any third party, does not contain any borrowings (plagiarism), and there are no other circumstances that may cause the Editorial Board to be liable to any third party as a the result of the use or publication of the Work/Article.

1.3. The author (s) declare that they have the right to dispose of the materials contained in the Work/Article, including texts, photographs, maps, plans, etc., and that the use of these materials in the Work/Article does not violate the rights of the third party.

1.4. The author (s) confirm that they are familiar with the article design requirements. The text of the Work/Article has been prepared in accordance with the editorial requirements regarding the publication in the *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering* periodical.

1.5. The author (s) declare that the Work/Article has not been previously published in full or in part (or under the same or another name) and that it has not been transmitted for publication to any other periodical publication in accordance with the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights".

§ 2

2.1. The author (s) provide the Editorial with free and no restrictions on the territory, time and number of copies full copyright of the Work/Article for the purpose of its publication in the *Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering* periodical in printed and electronic form, with the following terms of use:

- a) storage on any media devices;
- b) reproduction of the Work/Article, its parts or fragments by any known methods, copying Work/Article or parts and fragments thereof by any technique, including printing, risography, magnetic recording and digitization;
- c) saving on a computer and placing in private and public computer networks (including the Internet) and distribution over the networks;
- d) dissemination of the original and / or copies of the Work/Article, its separate parts or fragments, distribution and transfer to the use of the original or copies thereof.

2.2. The author(s) agree that the editorial work and duplication of the periodical publication shall be made with the voluntary contributions of the Publishers.

§ 3

3.1. The author(s) and the Editorial Board agree that the Editor will also be entitled to:

- a) make the necessary design of the Work/Article on the results of the editorial work;
- b) determine independently the number of publications, the printing of additional copies and the circulation of the Work / Article, the number of copies of individual editions and additional copies;
- c) the publication of the Work/Article in other editions related to the activities of the Editor than those specified in paragraph 2.1.

§ 4

4.1. The author (s) and Editorial hereby state that free use of the copyright under this agreement is free of charge.

4.2. Any changes to this Agreement must be made in hard copies.

4.3. Questions not regulated by the provisions of this Agreement shall be subject to the rules of the Civil Code and the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights".

4.4. Any disputes that may arise during the execution and during the term of this Agreement will be resolved within the territorial jurisdiction of the place where the Editorial is located.

The Agreement is made in 2 (two) identical copies – one to each of the Parties.

AUTHOR(S):

EDITORIAL BOARD:

1. _____
(Signature) (Full Name)

2. _____
(Signature) (Full Name)

3. _____
(Signature) (Full Name)

International scientific journal
Smart Technologies:
Industrial and Civil Engineering

Povitrianykh Syl Ave, 31, 31, Kyiv,
Ukraine, 03037
cybersec@knuba.edu.ua

_____ Y. Khlaponin

SMART TECHNOLOGIES:

INDUSTRIAL AND CIVIL ENGINEERING

Issue 4(17), 2025

Articles are published in the author's wording

- ▶ Design, style and contents of the magazine are subject to copyright and are protected by law
- ▶ The authors of the publications are responsible for the content and validity of the data given there
- ▶ The editorial staff reserves the right to edit and reduce the materials submitted
- ▶ All the articles have been positively evaluated by independent reviewers
- ▶ Reprints of material placed in the journal are allowed only with the written consent of the editorial board

Article reviewers

Nader Asnafi	PhD, Ass.Prof.
Goran Bryntse	PhD, Ass.Prof.
Stanislav Fic	Dr. hab eng, Prof.
Mykola Kuzminets	Dr.Tech.Sc, Prof.
Oleg Limarchenko	Dr.Tech.Sc., Prof.
Andrzej Marczuk	Dr hab eng, Prof.
Volodymyr Musiyko	Dr.Tech.Sc., Prof.
Bogdan Norkin	Dr.Phys. and Math.Sc.
Oleksandr Ovchinnikov	Dr.Tech.Sc., Prof.
Yurii Romasevych	Dr.Tech.Sc, Prof.
Eugene Shkvar	Dr.Tech.Sc, Prof.
Viktor Skachkov	Dr.Tech.Sc., Prof.

The journal is indexed in world databases

Google Academy <http://scholar.google.com.ua> CrossRef <https://www.crossref.org>
Index Copernicus www.journals.indexcopernicus.com Ulrichs Web <http://ulrichsweb.serialssolutions.com>
Web ИРБИС <http://irbis-nbuv.gov.ua>

The original layout is made in the editorial office of the journal Smart Technologies: Industrial and Civil Engineering

Responsible for the issue	<i>Dmytro Mischuk</i>
Linguistic consultant	<i>Anastasiia Khlaponina</i>
Computer layout	<i>Anna Liubushkina</i>
Editing and proofing	<i>Olha Tokarenko</i>
Layout and cover	<i>Anton Khaddad</i>

Journal Editorial Staff

KNUCA, Povitrianykh Syl Ave, 31, Kyiv, Ukraine, 03037,
Labor. corp., of. 361, Kyiv, Ukraine, 03037
+38 044 244 96 45, +38 050 311 0373
<http://uwtech.knuba.edu.ua/>, cybersec@knuba.edu.ua

Publisher and manufacturer

LLC "Lira-K Publishing"
Certificate No. 3981, DK series.
03142, Kyiv, str. V. Stusa 22/1
Phone (050) 462-95-48; (067) 820-84-77
Website: lira-k.com.ua, editor: zv_lira@ukr.net

Signed for printing on 18.06.2024 Format 60×84 1/8
Paper offset. Printing offset. Times New Roman
Cond. print. sheets 11,16. Circulation 100 copies

