Міністерство освіти і науки України
НТУ «Дніпровська політехніка»
ТОВ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Ройтлінгенський університет техніки та економіки (Німеччина)
Еслінгенський університет прикладних наук (Німеччина)
Технічний університет Фрайберзька гірнича академія (Німеччина)
Університет Кобленц-Ландау (Німеччина)
Вроцлавський технічний університет (Польща)
Краківська гірничо-металургійна академія (Польща)

ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОСВІТІ, НАУЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

XX МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

5 грудня 2025 року
м. Дніпро

Збірник наукових праць
№ 10

Дніпро
Журфонд
2025

УДК 622 (06)
П78

Редакційна колегія:
О.О. Азюковський, Г.Г. Півняк, О.С. Поважний, О.С. Бешта, В.А. Бойко, А.В. Голоядов, С.В. Детюк, О.В. Бондар, Є.Є. Мостіпан, І.М. Луценко, І.М. Удовик, Є.В. Кошеленко, М.О. Алексєєв, В.І. Корнієнко, В.В. Гнатушенко, О.О. Сдвижкова, Т.А. Желдак, О.О. Бешта, А.В. Бубліков, Ю.А. Папаїка, В.О. Пінчук, С.С. Худолій, Л.І. Мещеряков, А.І. Купін, М.І. Горбійчук, О.А. Дмитрієва, А. Дерен, Н. Нойбергер.

П78 **Проблеми** використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XX міжнар. конф. (5 грудня 2025 р., м. Дніпро): зб. наук. пр. / ред. кол.: О.О. Азюковський та ін.; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2025. – № 10. – 594 с.

ISBN 978-617-8737-34-4

Подано результати теоретичних та експериментальних досліджень з різних аспектів використання інформаційних технологій та енергетики в освіті, науці та керуванні промисловістю. У публікаціях розглянуто питання створення та вдосконалення інформаційних систем та технологій, системного аналізу та наук про дані, кібербезпеки та захисту інформації, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, цифрової трансформації енергетики, мехатроніки та робототехніки і електромобільності.

Для наукових, інженерно-технічних співробітників і студентів, які спеціалізуються в галузі інформаційних технологій.

УДК 622 (06)

ISBN 978-617-8737-34-4

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2025
© Журфонд, 2025

Вітаю, шановні учасники ***XX Міжнародної конференції з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості***. Накопичений досвід та знання наукових шкіл НТУ «Дніпровська політехніка» у галузі інформаційних технологій дозволив інтегрувати наші здобутки у реальні кейси в освіті, енергетиці та промисловості. Підкреслюючи надзвичайну важкі виклики, з якими зіткнулась наша країна під час воєнного стану, хочу підкреслити чинники, що призвели до необхідності перегляду стратегії розвитку та цифровізації енергетики. Існуюча генерація за рахунок використання традиційних технологій спричиняє значне погіршення екологічної ситуації та збільшення споживання органічного палива і, відповідно, зменшення його запасів та зростання ціни. Одночасно спостерігається об'єднання традиційних енергетичних систем і систем з розподіленою генерацією при активному використанні відновлюваних джерел енергії.

Необхідність врахування цих важливих вимог дозволила сформулювати нову ***концепцію розвитку енергетики*** (концепція Smart Grid). Концепція передбачає проведення системної трансформації енергетики на всіх етапах електроенергетичного процесу: генерація, передача, перетворення та розподілення енергії. Її реалізація носить інноваційний характер і створює необхідні умови визначального переходу до нового технологічного укладу в електроенергетиці та економіці країни.

Рівень керованості електричних мереж потребує відповідної елементної бази та програмного забезпечення. Розвиток концепції дозволить реалізувати вимоги: всі промислові та побутові енергоспоживачі отримують можливість організації взаємодії в інформаційній мережі, стануть керованими і будуть виконувати функції вимірювання власного споживання енергії та потужності.

Зважаючи на комплексність проблематики цифрової трансформації енергетики, наша конференція об'єднала науковців електроенергетичної галузі, комп'ютерних наук та автоматизації, мехатроніки та робототехніки, які презентують нові результати наукових та практичних робіт, що дозволить швидко та ефективно реалізувати проєкти повоєнного відновлення нашої країни!

Щиро Ваш академік НАН України Геннадій ПІВНЯК

РОЗДІЛ 1

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.316.13

Г.Г. Півняк[1], О.О. Азюковський[1], І.М. Луценко[1], Є.В. Кошеленко[1], О.О. Запишний[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Анотація. Розглянуто ключові принципи формування технічних рішень й реалізації проєктів систем розподіленої генерації для електрозабезпечення споживачів населених пунктів при застосуванні поточних обмежень та з урахуванням передумов післявоєнного відновлення енергетики і економіки.

***Ключові слова**: мікромережа, розподілена генерація, E-Mobility, установка зберігання енергії, графік електричних навантажень.*

Вступ. Післявоєнне відновлення енергетики України слід реалізовувати поетапно, із чітко встановленими горизонтами планування, паралельно з новими секторальними програмами.

1. Відновлення та балансування генерувальних потужностей у мережах (до 2030 року). Оціночний обсяг інвестицій – 30–50 млрд дол. США.

2. Досягнення енергетичного балансу та енергонезалежності в моделі “виробництво–споживання” (2030–2040 роки). Орієнтовна потреба в інвестиціях – 70–120 млрд дол. США.

3. Нарощування частки вуглецево-нейтральної генерації до 70–80 % (2030–2050 роки) з подальшим виходом на європейські ринки як конкурентного експортера електроенергії та енергоносіїв. Орієнтовний інвестиційний обсяг – 50–100 млрд дол. США.

Основними стратегічно важливими принципами розвитку сучасного енергетичного сектору України, що поєднують загальнодержавні інтереси та формують базу для підвищення інвестиційної привабливості галузі, мають стати:

- формування цілісної енергетичної екосистеми з прозорими ринковими механізмами регулювання, які стимулюють гнучкий та динамічний розвиток галузі шляхом залучення значного приватного капіталу;
- лібералізація та демонополізація ринків електроенергії й природного газу;
- науково-технічне обґрунтування внутрішніх потреб енергосистеми в обладнанні та енергетичних комплексах із дослідженням можливостей їхнього виробництва підприємствами вітчизняного високотехнологічного сектору;
- формування довгострокової (10–20 років) дослідницької стратегії взаємодії на зовнішніх енергетичних ринках.

Постановка задачі. Ключове значення для вирішення актуальних викликів енергетики матимуть інноваційні технології нового покоління, що забезпечують розвиток «інтелектуальних» енергосистем [1, 4-6]. Світовий тренд передбачає послідовну відмову від домінування генерації на основі викопного палива та інтенсивне розширення використання відновлюваних джерел енергії. Локальні електроенергетичні системи (мікромережі) здатні працювати автономно або в синхронізованому режимі з основною мережею, інтегруючи розподілену генерацію, системи накопичення енергії та інтелектуальне керування. У регіонах із нестабільним електропостачанням і підвищеним попитом на «зелену» енергію мікромережі забезпечують підвищення надійності та стійкості енергозабезпечення.

Основний зміст роботи. Реалізація проєктів мікромереждля населених пунктів передбачає інтеграцію кількох базових компонентів: генерувальних установок, систем зберігання енергії, мережевої інфраструктури та інтелектуальних систем керування. Технічні рішення орієнтовані на забезпечення автономності, енергоефективності, гнучкості режимів та можливості інтеграції з існуючою енергосистемою.

Базою таких проєктів є поєднання відновлюваних та традиційних джерел енергії. У житлових і малих комунальних системах найчастіше застосовуються фотоелектричні станції та малі вітрові турбіни, які доповнюються дизель-генераторами для резервування. Типовим рішенням є гібридна конфігурація, де PV-модулі потужністю 10–100 кВт інтегруються з інверторами для перетворення постійного струму на змінний. Ефективність ФЕС визначається інсоляційними умовами, кутом встановлення панелей і наявністю затінення, що потребує високоточного моделювання за допомогою програмних комплексів (HOMER, PVSyst, PVSol) [2].

Установки зберігання енергії ємністю 50–500 кВт·год упроваджуються з системами BMS, що забезпечують контроль та оптимізацію режимів заряджання/розряджання. Для населених пунктів вони відіграють ключову роль у балансуванні навантажень, максимізації самоспоживання, підвищенні безперервності та енергонезалежності, а їхня участь у ринкових механізмах наразі є обмеженою.

Мікромережі використовують низьковольтні мережі (0,4–10 кВ) із застосуванням «розумних» лічильників AMI для моніторингу та керування двонаправленими потоками енергії. Для взаємодії обладнання доцільним є впровадження стандарту IEC 61850, який забезпечує надійну синхронізацію з центральною енергосистемою.

Системи управління повинні включати алгоритми штучного інтелекту для оптимізації режимів, а також моделі MPC (Model Predictive Control) для прогнозування попиту. Для побутових споживачів це дає змогу реалізувати активне управління навантаженням через спеціальні користувацькі застосунки.

Критичний технічний аналіз мікромереж для населених пунктів виявляє баланс між інноваційністю рішень та практичними обмеженнями. Основні переваги:

• підвищена надійність та стійкість енергопостачання;

• підвищення енергоефективності та зниження витрат;

• мінімізація впливу на довкілля.

Водночас існують ключові виклики:

• висока капіталомісткість – створення мікромережі для 100–500 споживачів оцінюється у 1–5 млн дол. США залежно від масштабів та технічних рішень;

• складність експлуатації – ефективність сильно залежить від стабільності ВДЕ; за відсутності систем накопичення можливе зниження надійності на 20–30% та повне відключення мережевих ФЕС під час блекаутів; кіберзахист за IEC 62351 у багатьох реалізаціях залишається недостатнім;

• інтеграційні та регуляторні бар'єри – відсутність чітких норм щодо мікромереж ускладнює їхню синхронізацію з національною мережею та призводить до конфліктів інтересів між операторами та споживачами;

• масштабованість – для населених пунктів із понад 1000 споживачами потрібні багаторівневі мікромережні архітектури, що значно ускладнює керування та потребує інтенсивної AI-оптимізації.

Сталий розвиток мікромереж у пілотних проєктах (потужністю 50–200 кВт) передбачає обов'язкове застосування алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування та виконання комплексного ризик-аналізу щодо кібербезпеки в межах економічно обґрунтованої моделі. Важливим є також використання міжнародного досвіду, що дає змогу уникнути проблем електромагнітної сумісності та забезпечити гарантоване електроживлення від систем розподіленої генерації.

Технічні рішення з упровадження мікромереж у населених пунктах спрямовані на поетапний розвиток національної енергосистеми, забезпечуючи досягнення автономності, ефективності та стійкості. У перспективі мікромережі можуть стати фундаментом для широкого впровадження «інтелектуальних» енергетичних систем за умови збалансованого поєднання інновацій і практичних підходів [7].

Розвиток гібридних промислових та приватних фотоелектричних систем зі зберіганням енергії в Україні має значний потенціал і є ключовим напрямом на шляху до енергетичної незалежності та зміцнення стабільності територіальних громад [3]. Зростання попиту на «зелену» енергію, прогрес технологій і державна підтримка формують сприятливі умови для масштабного розвитку відповідних рішень.

Прикладом практичної реалізації таких систем є впровадження установок зберігання енергії комерційно-промислового класу сімейства LUNA2000 виробництва компанії Huawei, яка вже реалізувала у світі понад **2 ГВт·год** подібних рішень (рис. 1).

Рис. 1. BESS LUNA2000 з повітряним охолодженням

Залежно від бізнес-моделі, за якою працює власник УЗЕ, можна виділити два основних сценарії їх використання в електричних мережах:

- ✓ УЗЕ на власне споживання (основна роль – зменшення плати за електроенергію постачальнику);
- ✓ промислові УЗЕ (працюють на ринку електричної енергії з метою забезпечення безпосереднього продажу електроенергії або потужності як товару).

Прикладом реалізації першого сценарію мікромережі з ФЕС та УЗЕ є проєкт енергоефективного низьковуглецевого електрозабезпечення споживача – закладу освіти (рис. 2).

Рис. 2. Мікромережа з ФЕС та УЗЕ на прикладі закладу освіти

Мета встановлення та використання УЗЕ споживача такого типу: оптимізація власного споживання; утилізація надлишків генерації ФЕС; забезпечення безперебійності роботи обладнання під час відключень (рис. 3).

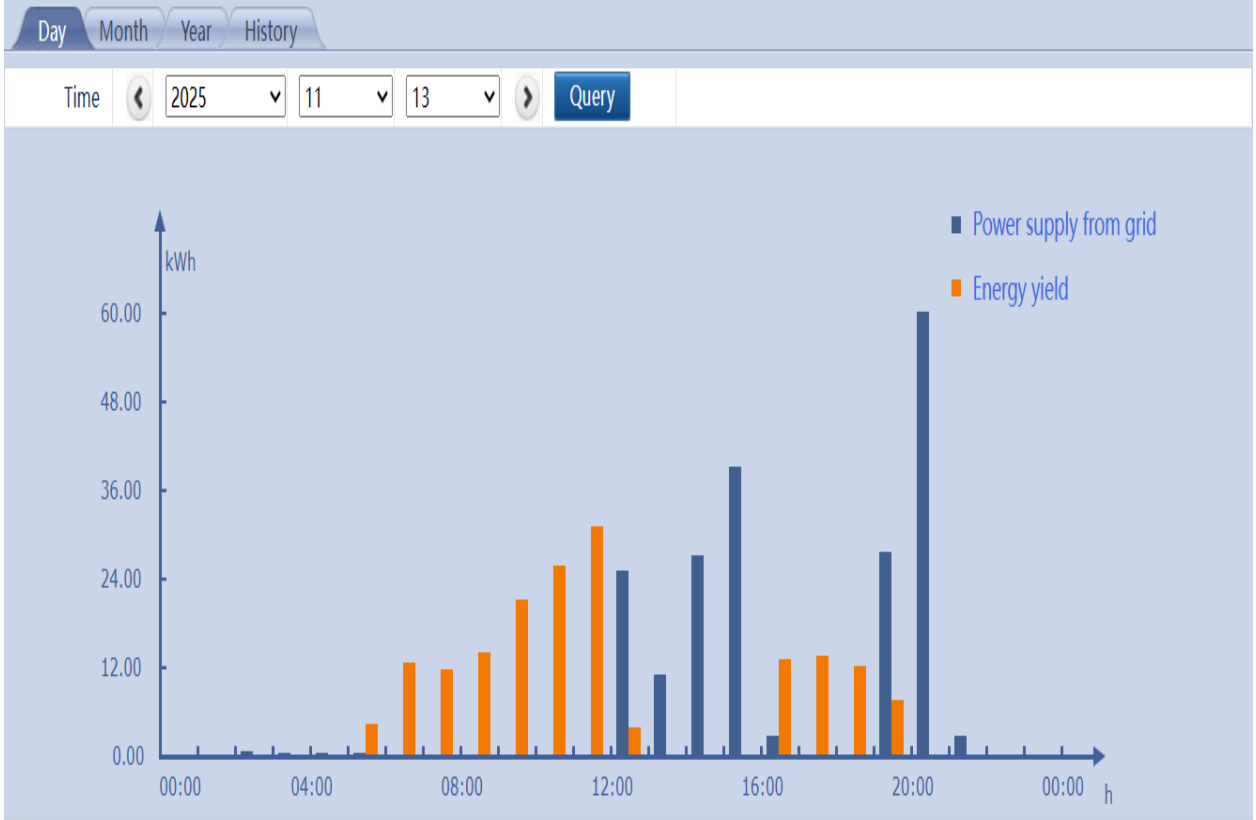


Рис. 3. Режим роботи мікромережі закладу освіти з ФЕС та УЗЕ в умовах застосування графіків погодинних відключень 13.11.2025 р. зі збереженням живлення критичної інфраструктури (оранжевий – робота УЗЕ в off-grid, синій – живлення від мережі)

Другий сценарій застосування установок зберігання енергії (УЗЕ) передбачає їхнє використання для вирішення завдань у середовищі ринку електричної енергії, зокрема: надання допоміжних послуг, перенесення обсягів генерації у години з вищою ціною, мінімізації втрат у разі обмеження генерації, скорочення витрат за небаланси тощо. Реалізація таких функцій можлива як під час проєктування нових ФЕС із УЗЕ оптимальної потужності та ємності, так і через інтеграцію систем накопичення до вже існуючих станцій з подальшим переходом до гібридної архітектури. Основні цілі впровадження УЗЕ включають: оптимізацію власного споживання, утилізацію надлишкової генерації СЕС та контроль потужності споживання в точці приєднання.

Комерційні та промислові системи накопичення енергії зазвичай реалізуються із застосуванням Smart-технологій, що забезпечують виконання типових бізнес-моделей і підтримку необхідних режимів роботи в складі мікромереж з відновлюваними джерелами енергії.

Режим максимального самоспоживання (Maximum Self-Consumption) передбачає акумулювання надлишкової сонячної генерації, яка не споживається навантаженням. У разі недостатньої або відсутньої генерації УЗЕ розряджається, забезпечуючи живлення споживачів. Це дозволяє підвищити рівень власного споживання та знизити обсяг імпортованої енергії з централізованої мережі.

Режим використання енергії за часом (Time of Use) полягає у розряджанні батареї під час пікових тарифів та її заряджанні у періоди низьких цін з мережі або від ФЕС. Режим є особливо ефективним за наявності графіків планових відключень (ГПВ), оскільки дозволяє завчасно запрограмувати оптимальний цикл заряджання/розряджання та забезпечити роботу критичної інфраструктури в умовах відсутності централізованого електроживлення.

Режим зменшення пікових навантажень (Peak Shaving) застосовується для запобігання перевантаженням мережевого обладнання, відмовам чи аварійним відключенням, а також у випадках перевищення договірної потужності. УЗЕ працює в автоматичному режимі та компенсує дефіцит потужності. Використання такого режиму дає змогу зменшити величину договірної потужності при проєктуванні системи, за умови що споживач передбачає встановлення УЗЕ достатньої ємності.

Перелічені режими роботи УЗЕ можуть бути змінені диспетчером мікромережі або виконуватися із автоматичним перемиканням залежно від умов. Для цього система накопичення повинна бути оснащена інтегрованою або сумісною системою енергетичного менеджменту (EMS). Це є критично важливим у випадках, коли до мікромережі підключена значна кількість різнорідних джерел енергії та необхідно забезпечити їх оптимальне, пріоритетне використання з урахуванням технічних і економічних показників.

Наукова новизна роботи полягає у формулюванні ключових принципів та аспектів забезпечення енергонезалежності та енергетичної безпеки споживачів населених пунктів в умовах вимушеного енергетичного переходу до гібридних систем розподіленої генерації з урахуванням підтвердженого досвіду експлуатації відповідної системи та тестуванні її основних режимів.

Висновки. Забезпечення надійного живлення типових споживачів міст в умовах застосування графіків погодинних та екстрених відключень є неможливим без впровадження проєктів й технічних рішень гібридних систем розподіленої генерації у комбінації фотоелектричних станцій та УЗЕ раціональної потужності / ємності. Це дозволяє підвищити енергетичну ефективність та екологічність, забезпечити стабільну роботу критичної інфраструктури конкретного споживача, сприяє диверсифікації джерел живлення, реалізуючи смарт-керування режимом генерації/споживання електроенергії в умовах мікромережі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pivniak H., Aziukovskyi O., Papaika Yu., Lutsenko I., Neuberger N. (2022). Problems of development of innovative power supply systems of Ukraine in the context of European integration. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (5), 89-103. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/089.
2. Lutsenko I., Rukhlova N., Kyrychenko M., Tsyhan P., Panchenko V. (2023). Increasing the energy efficiency of modes of distribution networks with photovoltaic stations. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu.(1), 99-106 https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099
3. Є.В. Кошеленко, І.М. Луценко, О.А. Замкова, П.С. Циган, А.О. Кошеленко. Технології створення систем комбінованого живлення об'єктів міст (2024). *Збірник наукових праць НГУ* 79, 222–230. https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.222
4. Трансформація енергетики України в «інтелектуальну» ресурсно незалежну систему: навчальний посібник / О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко, О.Г. Лисенко; Нац. акад. наук України, М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: ГРАНІ, 2023. –56 с.
5. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник / Г.Г. Півняк, О.В. Кириленко, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 6-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 710.
6. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: монографія / За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
7. Стратегія майбутнього: Україна - це енергетичний хаб, який допоможе Європі позбутися залежності від росії. Retrieved from https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii.

УДК 621.3:622.012

Ю.В. Удовіков[1], Ю.А. Папаїка[2], А.В. Рухлов[3], О.О. Селянський[3]
[1]Шахта ім. «Героїв Космосу» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», Павлоград, Україна
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[3]ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Запоріжжя, Україна

ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПІДЗЕМНУ СИСТЕМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВУГІЛЬНОЇ ШАХТИ

Анотація. У сучасних умовах трансформації вугільної промисловості зростає потреба у підвищенні надійності, керованості та енергоефективності підземних систем електропостачання. Традиційні підходи все частіше поступаються місцем цифровим рішенням – системам моніторингу та діагностики, оперативного керування, інтелектуальним засобам захисту та зв'язку, що здатні працювати у складних умовах вугільних шахт. Впровадження цифрових технологій у підземну інфраструктуру відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності, зниження аварійності, оптимізації режимів роботи електрообладнання та підвищення загального рівня промислової безпеки. У роботі представлений практичний досвід застосування таких рішень на вугільній шахті, висвітлені основні технічні параметри та визначені перспективи їх подальшого розвитку.

***Ключові слова**: цифрові технології, підземна система електропостачання, вугільна шахта, підстанція.*

Вступ. У сучасних умовах трансформації промисловості у рамках концепцій Industry 4.0 і 5.0 зростає потреба у підвищенні надійності, керованості та енергоефективності електроенергетичних систем. Традиційні підходи все частіше поступаються місцем цифровим технологіям – системам моніторингу й діагностики, платформам оперативного керування, інтелектуальним засобам захисту та зв'язку. Пов'язані із цими аспектами питання широко обговорюються науково-практичною спільнотою України та світу, наприклад, у роботах [1, 2]. Загально-промисловий тренд на діджиталізацію торкнувся й вуглевидобувних підприємств, тому що впровадження цифрових технологій у підземну інфраструктуру відкриває можливості для покращення якості електроенергії, зниження аварійності, оптимізації режимів роботи електрообладнання та підвищення загального рівня промислової безпеки. Цифрові рішення певним чином знаходять своє застосування у системах життє- та електрозабезпечення вугільних шахт, чому присвячені роботи [3-6]. Однак через низку причин практичний досвід впровадження таких рішень саме у підземну систему електропостачання вуглевидобувних підприємств ще не знайшов свого належного місця та, відповідно, висвітлення.

Постановка задачі. Отже, у роботі поставлені та розкриті основні завдання щодо представлення практичного досвіду застосування цифрових

технологій у підземній системі електропостачання вугільної шахти, висвітлення основних технічних результатів та визначення перспектив їх розвитку.

Основний зміст роботи. Шахта ім. «Героїв Космосу» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» є одним з провідних вуглевидобувних підприємств не тільки Західного Донбасу, а й усієї України. На шахті планомірно та цілеспрямовано впроваджують заходи, спрямовані на підвищення енергоефективності та надійності її роботи: сучасне електромеханічне обладнання для основних технологічних процесів, інструментарій для ремонту та обслуговування, прогресивне устаткування системи електропостачання (керований фільтро-компенсувальний пристрій на поверхні, підземна компенсація реактивної потужності) тощо.

Враховуючи це, сучасний тренд на впровадження цифрових технологій не міг оминути вуглевидобувне підприємство. Складні гірничо-геологічні умови функціонування обладнання підземної системи електропостачання шахт створюють значні проблеми для постійного моніторингу та надійного керування комутаційною та захисною апаратурою. Особливо це актуально для високовольтних вибухозахищених комірок (КРУВ) підземних розподільчих пунктів РПП і центральних підстанцій ЦПП напругою 6 кВ, які забезпечують живлення усього підземного технологічного устаткування. Саме тому на шахті ім. «Героїв Космосу» запроваджено систему диспетчерського керування та збору даних (SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition) для комірок РПП і ЦПП-6 кВ.

Загалом така система дозволяє реалізувати наступні функції:

• моніторинг: збір даних з різних високовольтних комірок;

• візуалізація: графічне представлення даних та стану комірок на екрані монітора, що спрощує сприйняття інформації оператором;

• керування: дистанційне керування комірками через інтерфейс оператора;

• збір та архівування даних: реєстрація інформації для подальшого аналізу та звітів;

• сигналізація: сповіщення оператора про аварійні та попереджувальні ситуації.

Функціональна система побудована наступним чином. З серверної на поверхні прокладена оптична лінія зв’язку в шахту до РПП та ЦПП. У кожному РПП встановлена шафа зв’язку, куди заходить оптичний кабель та підключається до оптичного іскробезпечного комутатора Mikrotik CRS106, а з нього по ethernet – до іскробезпечного перетворювача інтерфейсу MOXA N5430i. Безпосередньо до цього перетворювача вже підключаються комірки. У кожній комірці встановлений контролер БЗУ-2-11 виробництва ТОВ «Рудпромавтоматика». Цей контролер підключається до MOXA по RS485 інтерфейсу за протоколом Modbus RTU. На один порт послідовно підключаються до 20 комірок, кожна зі своєю адресою. За допомогою SCADA-системи, побудованої на базі програмного забезпечення AVEVA, відбувається моніторинг та керування комірками, а також цілодобова архівація параметрів та контроль, з якого облікового запису було

зроблено керування коміркою та хто змінював уставки. Окрім цього, система дозволяє онлайн аналізувати роботу вибухозахищених установок компенсації реактивної потужності УКРВ-6 кВ.

На фрагменті робочого столу оператора системи відображається топологія усієї системи підземного електропостачання 6 кВ. За допомогою відповідних мнемосхем показані усі комірки КРУВ-6 залежно від їх типу (ввідна, секційна, відходячих приєднань).

На мнемосхемі високовольтної комірки відображається наступна інформація

• спливаюча підказка;
• поточний стан комірки;
• номер комірки на схемі електропостачання;
• опис споживачів, що живляться від комірки (з можливістю редагування).

Мнемосхема комірки має наступну кольорову індикацію:

• сіре штрихування на білому фоні – стан комірки не може бути визначений з причини поганої якості вихідних даних;
• червона – наявність аварійного сигналу від комірки;
• жовта – комірка вимкнена;
• жовта із зеленим блиманням – комірка вмикається;
• зелена – комірка ввімкнена;
• напівпрозоре червоне блимання – наявність неквитованих (не підтверджених) аварійних подій.

Керування та моніторинг стану високовольтної комірки здійснюється за допомогою Modbus ретранслятору БЗУ-РК та блока керування БЗУ-2. Окрім індикації струмів комірки, напруги, споживання електроенергії та стану сигналізації БЗУ, мнемосхема має кнопки вмикання, вимикання та деблокування комутаційного апарату комірки 6 кВ.

Практична новизна роботи полягає у наданні практичного досвіду впровадження цифрових технологій у вигляді системи SCADA для диспетчерського керування та збору даних вибухозахищеними комірками РПП і ЦПП-6 кВ підземного електропостачання вугільної шахти. Подальшим розвитком вказаної системи бачиться розширення її функціоналу на наступні рівні схеми електропостачання, особливо на рівень пересувних та (або) стаціонарних комплектних трансформаторних підстанцій 6/1,2(0,69) кВ.

Висновки. Отже, впровадження цифрових технологій у підземну систему електропостачання дозволяє оптимізувати споживання електроенергії гірничим обладнанням, керувати навантаженнями у відповідні періоди та покращувати коефіцієнт потужності за допомогою ефективного застосування автоматизованих компенсуючих установок. Загалом цифрова трансформація підземних систем електропостачання веде до створення самокерованих та енергетично стійких комплексів. Вона підвищує безпеку, зменшує експлуатаційні витрати й відкриває простір для нових технологічних рішень у гірничовидобувній галузі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кавун І., Замулко А. Цифровізація в електроенергетичних системах. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*, 2025. № 5. 185-191. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-23
2. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2025. № 1 (128). 122-134. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-14
3. Хорольський В.П., Шпанько М.І. Інтелектуальна система управління електроспоживанням стаціонарних установок шахт. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2015. № 4. 173-179.
4. Papaika Yu.A., Lysenko O.G., Rodna K.S., Shevtsova O.S. Information technologies in modeling operation modes of mining dewatering plant based on economic and mathematical analysis. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020. № 4. 82-87. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/082
5. Диспетчеризація підстанції "Ювілейна" 110 кВ, "ДТЕК Павлоградвугілля". URL: https://www.svaltera.ua/solutions/projects/9217.php?utm (дата звернення: 18.11.2025)
6. У ДТЕК Енерго створили першу в Україні «цифрову шахту». URL: https://dtek.com/media-center/news/v-dtek-energo-sozdali-pervuyu-v-ukraine-tsifrovuyu-shakhtu (дата звернення: 18.11.2025)

УДК 621.3:622.012

Г.Г. Півняк[1], Ю.А. Папаїка[1], О.Г. Лисенко[1], М.М. Малишко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АТ «НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»

Анотація. У роботі узагальнено практичний досвід АТ «Нікопольський завод феросплавів» щодо цифрової модернізації системи електропостачання, з особливим акцентом на розвиток та інтеграцію власної SCADA-мережі. Показано, як побудова багаторівневої системи диспетчерського контролю, оперативного збору даних та дистанційного керування дала можливість перейти від фрагментарного контролю обладнання до повноцінного цифрового управління енергогосподарством.

Описано ключові технічні рішення: модернізацію каналів зв'язку, встановлення інтелектуальних пристроїв на живильних і розподільчих підстанціях, розширення системи комерційного та технічного обліку, а також впровадження алгоритмів аналізу навантажень та діагностики аварійних режимів у реальному часі. Наведено результати роботи оновленої інфраструктури, які засвідчують підвищення надійності електропостачання, скорочення часу реагування персоналу та покращення енергоефективності.

Представлений досвід демонструє практичну цінність цифрових рішень у складних умовах сучасного енергетичного середовища та підтверджує доцільність подальшого розвитку SCADA-мережі як основи для підвищення стійкості та керованості енергосистеми підприємства.

Ключові слова: *цифровізація, SCADA-мережа, диспетчерський контроль, енергоменеджмент, система електропостачання, моніторинг навантажень, автоматизація, діагностика аварійних режимів, енергоефективність, АТ «НЗФ».*

Вступ. Сучасні вимоги до надійності та керованості систем електропостачання в промисловості зумовлюють необхідність переходу від традиційних методів експлуатації до комплексних цифрових рішень. Для підприємств з енергоємним виробництвом, таких як АТ «Нікопольський завод феросплавів», стабільність електропостачання безпосередньо впливає на технологічні процеси, якість продукції та рівень енергетичної безпеки.

У цих умовах цифровізація енергогосподарства перестає бути лише інструментом модернізації й перетворюється на ключовий елемент стратегічного розвитку. Центральне місце в цій трансформації займає побудова сучасної SCADA-мережі, що забезпечує оперативний контроль параметрів роботи обладнання, дистанційне керування та гнучку інтеграцію нових функцій автоматизації.

Перехід до цифрового середовища дає можливість підвищити деталізацію обліку, зменшити кількість позаштатних ситуацій та оптимізувати використання електричної енергії. Разом із тим впровадження таких технологій вимагає

адаптації існуючої інфраструктури, створення єдиних стандартів даних та переорієнтації підходів до організації технічного обслуговування.

У цій роботі представлено практичний досвід АТ НЗФ у розгортанні та розвитку цифрових систем управління електропостачанням, а також окреслено ті результати й переваги, які отримано внаслідок впровадження сучасної SCADA-інфраструктури.

Постановка задачі. Основною проблемою, з якою зіткнулось АТ «НЗФ», була фрагментарність контролю та низька оперативність отримання даних про стан електрообладнання в різних енергетичних підрозділах. Наявні системи не забезпечували повної інтеграції між підстанціями, щитами управління та комерційними вузлами обліку, що ускладнювало своєчасне реагування на аварійні режими та перешкоджало впровадженню сучасних методів енергоменеджменту. В умовах зростання навантажень, частих змін режимів роботи та зовнішніх ризиків виникла потреба у єдиному цифровому середовищі, здатному забезпечити повну прозорість і керованість системи електропостачання.

Завданням підприємства стало створення масштабованої SCADA-мережі, яка охоплювала б усі ключові елементи енергогосподарства та дозволяла здійснювати централізований збір, обробку й аналіз даних у реальному часі. Потрібно було забезпечити можливість дистанційного керування обладнанням, автоматизацію типових технологічних операцій, підвищення якості обліку та формування єдиного інформаційного простору для диспетчерів і енергетичних служб. Реалізація цих завдань мала створити фундамент для подальшого підвищення надійності, енергоефективності та стійкості електропостачання заводу.

Основний зміст роботи. У процесі цифрової модернізації системи електропостачання АТ «НЗФ» ключовим завданням стало створення єдиної SCADA-мережі, здатної забезпечити безперервний обмін даними між підстанціями, вимірювальними пристроями та диспетчерськими пунктами. Для цього була розгорнута програмно-апаратна платформа збору та логування даних, що дозволила стандартизувати параметри зв’язку, структуру сигналів і методи взаємодії з обладнанням. Центральним інструментом став модуль конфігурації, у якому налаштовувались порти зв’язку, протоколи Modbus RTU/TCP, адресація пристроїв та параметри логування. Кожен порт контролера отримав визначений перелік приєднаних вузлів, а підстанції були зведені в єдине інформаційне поле, що дало змогу дистанційно відстежувати параметри та стан комутаційного обладнання.

Особлива увага була приділена структуризації даних, зокрема формуванню аналогових та дискретних сигналів. Для кожного каналу задавались адреси регістрів, коефіцієнти масштабування, функції Modbus та типи адрес. Такий підхід забезпечив однорідність даних для подальшої обробки та дозволив виключити розбіжності у вимірюваннях, що часто виникають при роботі з обладнанням різних виробників. Завдяки системі логування вдалося створити

повноцінні історичні записи навантажень, подій та аварійних ситуацій, що дозволяє проводити технічний аналіз і підвищувати якість управлінських рішень.

В основу SCADA-інфраструктури були покладені спеціалізовані польові пристрої типу **UMD (Universal Measurement Device)** та **UCD (Universal Control Device)**. UMD виконують функцію універсальних вимірювальних модулів, до складу яких входять канали підключення трансформаторів струму і напруги, високоточні АЦП, процесорний блок обробки сигналів та комунікаційний модуль. Пристрої забезпечують вимірювання ключових параметрів енергосистеми — напруги, струму, активної та реактивної потужності, частоти, перекосів фаз, а також формують телеметрію для SCADA. Архітектура UMD включає гальванічну розв'язку, FRAM/EEPROM для зберігання конфігурації та модуль логування, що дозволяє вести профіль навантаження безпосередньо на пристрої. UCD, у свою чергу, виконують роль логічних пристроїв керування. Вони оснащені окремим процесорним блоком з підтримкою алгоритмів пуску/останову, міжзахисних блокувань, формуванням команд на виконавчі механізми та фіксацією станів дискретних входів. Наявність ізольованих дискретних входів і виходів дозволяє інтегрувати UCD із вимикачами, контакторами, релейними схемами та іншими елементами підстанцій. Комунікаційний модуль UCD забезпечує обмін із SCADA по Modbus RTU/TCP, а модуль самодіагностики контролює напругу живлення, температуру та справність сигнальних ланцюгів.

Інтеграція UMD та UCD у єдину SCADA-мережу створила багаторівневу архітектуру, де вимірювання та логіка керування працюють узгоджено. UMD відповідають за точний збір телеметрії, а UCD – за формування керуючих команд та реалізацію технологічних алгоритмів. Диспетчерська служба отримала можливість контролювати всі ключові процеси в реальному часі, оцінювати навантаження, відслідковувати стан обладнання та оперативно реагувати на технологічні відхилення.

Таким чином, упроваджена система забезпечила якісно новий рівень автоматизації енергогосподарства АТ «НЗФ». Стандартизована архітектура, гнучка конфігурація пристроїв, детальне логування та централізоване управління створили фундамент для подальшого розвитку енергоефективності, підвищення надійності електропостачання та розширення цифрової інфраструктури підприємства.

У межах цифровізації енергетичної та IT-інфраструктури була впроваджена спеціалізована система моніторингу мережевого та серверного обладнання. Вона забезпечує автоматичний збір інформації про стан пристроїв, їхнє завантаження, параметри працездатності та доступність. Такий інструмент широко застосовується в корпоративних мережах, центрах обробки даних, на підприємствах із розгалуженою інфраструктурою та серед провайдерів, оскільки дозволяє створити повну картину технічного стану всіх ключових елементів.

Система підтримує роботу з маршрутизаторами, комутаторами, серверними платформами (Linux, Windows, BSD), системами зберігання, технологіями віртуалізації, а також енергетичними пристроями на кшталт ДБЖ та інтелектуальних модулів живлення. Завдяки використанню таких протоколів, як SNMP, IPMI, LLDP та різних API-інтерфейсів, забезпечується широке охоплення телеметрії.

Основними можливостями є моніторинг навантаження (процесор, оперативна пам’ять, пропускна спроможність інтерфейсів, температура, живлення), автоматичне виявлення обладнання за IP-адресою та побудова історичних графіків. У разі відхилень від нормальних режимів система надсилає сповіщення про недоступність пристроїв, аномальний ріст чи падіння трафіку, підвищену температуру або заповнення дискового простору. Наявність детальної історії роботи дає змогу планувати модернізацію, оцінювати пропускну здатність і прогнозувати розвиток навантажень.

Завдяки простому веб-інтерфейсу доступ до інформації та керування функціями може здійснюватись через будь-який браузер. Система добре підходить саме для мережевого моніторингу, забезпечуючи високу інформативність без складного налаштування, що робить її ефективним інструментом для оперативного контролю та підтримання працездатності критично важливої інфраструктури підприємства.

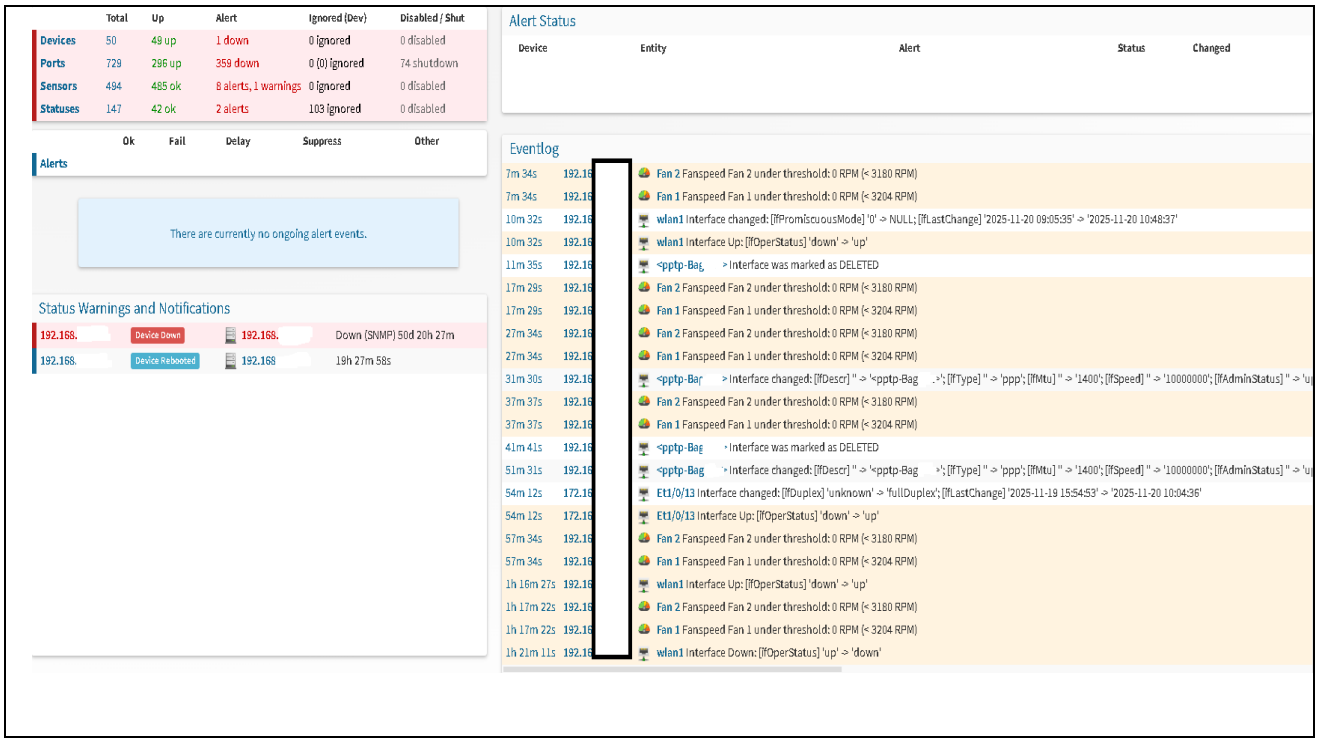


Рис. 1. Система моніторингу мережі

Практична новизна роботи полягає у впровадженні інтегрованої системи моніторингу мережевої та серверної інфраструктури, яка забезпечує оперативний контроль стану обладнання, підвищує рівень інформаційної

безпеки та дозволяє своєчасно реагувати на відхилення у роботі критично важливих елементів. Запропоновані технічні рішення дозволили автоматизувати збір телеметрії, створити єдине інформаційне середовище для аналізу продуктивності, оптимізувати навантаження та знизити ймовірність аварійних простоїв. Реалізована архітектура підвищує надійність функціонування виробничих та енергетичних систем підприємства, а також створює основу для подальшого розвитку цифрової інфраструктури.

Висновки. Впровадження цифрових технологій у систему електропостачання дозволяє в режимі реального часу контролювати стан мережевого та виробничого обладнання. Це забезпечує своєчасне виявлення перевантажень, збоїв та аномалій, підвищуючи надійність енергопостачання. Цифрові платформи автоматизують збір та аналіз даних, що оптимізує управління навантаженням і знижує втрати електроенергії. Впровадження дистанційного моніторингу і систем прогнозування дозволяє планувати технічне обслуговування і запобігати аварійним ситуаціям. Цифровізація сприяє підвищенню енергоефективності та економічної стійкості підприємства. Загалом, інтеграція сучасних інформаційних рішень у енергосистему створює фундамент для безпечного, ефективного та надійного електропостачання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волошко А., Джеря Т. Дослідження інформаційних потоків в управлінні режимами інтелектуальних енергосистем // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279635. energy.kpi.ua
2. Руднєв Є., Романченко Ю. Комплексний аналіз стану та перспективи розвитку енергетики України відповідно до концепції Smart Grid // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 1. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2024.297587. energy.kpi.ua
3. Друбецька Т., Земський Д., Шмельова В., Артемчук В. Розвиток технологій будівництва цифрових підстанцій // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 1. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2024.297585. energy.kpi.ua
4. Ярова І. Від класичної до цифрової підстанції: аналіз впровадження стандарту IEC 61850 // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати». 2025. — С. … gm.khpi.edu.ua
5. Мазурок В. І., Дребіт А. М., Онисько Ю. Ю., Бабюк С. М. Цифровізація розподільних електричних мереж // Матеріали XIII МНПК «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 11–12 грудня 2024. С. 258–260. elartu.tntu.edu.ua
6. Дергачова В. В., Хлебинська О. І., Дергачова Г. М. Цифрові трансформації бізнес-процесів енергетичних підприємств та особливості їх правового забезпечення // Економічний вісник НТУУ «КПІ». 2024. № 31. DOI: 10.20535/2307-5651.31.2024.319017. ev.fmm.kpi.ua
7. He X., Ai Q., Qiu R. C., Zhang D. Preliminary Exploration on Digital Twin for Power Systems: Challenges, Framework, and Applications. arXiv, 2019. arXiv
8. Saleem Y., Crespi N., Rehmani M. H., Copeland R. Internet of Things-aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions. arXiv, 2017. arXiv
9. Diamantoulakis P. D., Kapinas V. M., Karagiannidis G. K. Big Data Analytics for Dynamic Energy Management in Smart Grids. arXiv, 2015. arXiv

УДК 652.1:586.24

О.О. Азюковський[1], С.К. Шихов[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ КОРОЗІЙНИХ РИЗИКІВ ВИКЛИКАНИХ РОБОТОЮ СУМІЖНИХ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Анотація. Наведено методи, що сповільнюють процеси електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів, які обумовлені суміжною роботою станцій катодного захисту. Позитивний ефект досягається за рахунок мінімізації різниці потенціалів в точках підключення двох суміжних СКЗ.

***Ключові слова**: підземні сталеві трубопроводи, станції катодного захисту, електрохімічна корозія, захисний потенціал, алгоритми керування, різниця електричних потенціалів.*

Вступ. Серед країн Європейського Союзу Україна має одну з найбільш протяжних і розгалужених мереж газопровідного транспорту зі складною топологією. Газотранспортна Системи (ГТС) України складається з близько 33,2 тис. км магістральних трубопроводів, що є другим показником в Європі (перше місце посідає Німеччина з 40 тис. км магістральних трубопроводів) [1], та розвинена Газорозподільна мережа (ГРМ), яка за даними НКРЕКП сягає близько 290 тис. км [2].

Враховуючи на значний економічний позитивний вплив щодо забезпечення стійкості галузей економіки, мінімальну залежність від погодних умов та здатність транспортувати значні обсяги газу за одиницю часу, до надійності та безперервності роботи трубопроводів висуваються суворі вимоги щодо їх цілісності, збереження терміну експлуатаційних характеристик. Сталеві підземні газопроводи характеризуються високими показниками механічної стійкості до впливу геотектонічних зсувів ґрунту і довготривалим терміном експлуатації, що також є критичним для забезпечення безперебійного транспортування газу. Водночас, сталеві трубопроводи мають схильність до електрохімічної корозії, що призводить до погіршення механічних характеристик газогону, появи тріщин, пітінгів та наскрізних отворів, які окрім прямих втрат транспортуємого природнього газу також формують негативні екологічні наслідки.

Для захисту підземних трубопроводів від корозійних впливів використовуються активний захист важливим елементом якого є станції катодного захисту (СКЗ), розташовані вздовж нитки трубопроводу, які виконують роль джерел зовнішнього струму, що пригнічує і сповільнює корозійні процеси [3]. У результаті чого формується електротехнічна система, яка складається із суміжних СКЗ, які гальванічно з’єднані між собою підземним сталевим трубопроводом, а отже мають взаємний вплив, який за певних обставин ускладнює корозійну ситуацію на окремих ділянках об’єкту захисту.

Постановка задачі.

- виокремити процеси, що протікають у електротехнічній системі електротехнічного захисту підземних сталевих трубопроводів за умов одночасної роботи СКЗ які є суміжними та гальванічно пов'язаними об'єктами захисту і обумовлюють їх взаємний вплив;
- визначити основні фактори ризику, що є наслідком від суміжної роботи двох СКЗ;
- розробити методи мінімізації їх негативного впливу на інтенсивність корозійних процесів.

Основний зміст роботи. На основні проведених досліджень [4, 5] можливо зробити висновки про необхідність розробки таких законів керування станціями катодного захисту, які можуть забезпечити оперативне реагування на зміни режимів роботи суміжних станцій за умов часткового блєкауту (знеструмлення). Основною метою законів керування є забезпечення максимально можливого за поточних умов рівня захисного потенціалу, який сповільнює швидкість протікання корозійних процесів підземних сталевих трубопроводів. При цьому захисний потенціал, що можливо утворювати у цьому позаштатному режимі, часто може не сягати рекомендованих значень -0,75 В [6], а принаймні повинен подовжувати цілісність підземного трубопроводу шляхом утримання потенціалу більш від'ємного за власний потенціал металу трубопроводу в умовах відсутності електрохімічного захисту, що призводить до сповільнення корозійних процесів.

Під час формування захисного потенціалу підземним сталевим трубопроводом протікають струми стікання або натікання до навколишнього середовища та струми, які протікають поверхнею трубопроводу [4].

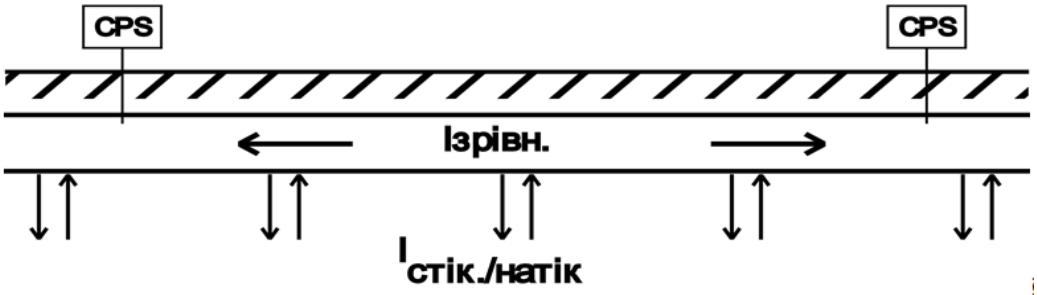


Рис. 1. Струми, що протікають підземним сталевим трубопроводом

Як наслідок, утворюються необхідність надання рекомендацій та законів керування щодо мінімізації корозійних впливів кожного з струмів (стікання або натікання до навколишнього середовища та струмів вирівняння, які обумовлені наявністю різниці потенціалу у тому числі в наслідок неузгоджених режимів роботи СКЗ, що працюють сумісно).

Струми, що стікають або натікають на підземний трубопровід із навколишнього середовища, а отже приймають основну участь у корозійних процесах за умови їх домінування за амплітудою, що викликані саме взаємодією металу газопроводу і ґрунту, є основним фокусом робіт багатьох дослідників, і як наслідок представляють собою питання яке має достатньо широкий спектр рекомендацій та алгоритмів щодо їх мінімізації.

На основі моделювання впливів різних частотних складових на трубопровід в публікаціях [7, 8] зроблено висновки, що у випадку пошкодженої, недосконалої, застарілої, пористої ізоляції струми стікання / натікання становлять значну частину усієї потужності, що споживається станцією катодного захисту і майже не залежить від частоти.

Відповідно, схемотехнічне рішення випрямляча, що входить до складу СКЗ, закони керування силовими ключами безпосередньо обумовлюють спектр частот у складі сигналу на виході станції катодного захисту, не відіграє значної ролі і може обиратися виходячи із необхідності забезпечення потрібного рівня керування системою. При цьому максимальну гнучкість керування режимами роботи СКЗ, забезпечує саме використання сучасних високочастотних перетворювачів.

У іншому випадку, коли підземний трубопровід має нову, якісну ізоляцію, значного випливу на систему завдає її ємнісна складова у електротехнічній схеми заміщення. Це в свою чергу обумовлює вплив високочастотних складових вихідного сигналу станцій катодного захисту на величину струмів стікання натікання [7,8]. Що означає, що із підвищенням якості ізоляції трубопроводу, більш бажаними схемотехнічними рішеннями, є класичні, такі як мостовий некерований та найпростіший керований випрямлячі, що забезпечують мінімальний розподіл потужності вихідного сигналу у високочастотний діапазон.

Водночас, для зменшення амплітуди струмів, що протікають поверхнею сталевого підземного трубопроводу потрібно забезпечити мінімальну різниці потенціалів, що формуються СКЗ, які працюють сумісно. Зменшити різницю потенціалів за миттєвими значеннями вихідних сигналів СКЗ, які працюють одночасно та гальванічно пов’язані об’єктом захисту можливо шляхом використання уніфікованих схемотехнічних рішень перетворювачів, які входять до складу цих станцій. Однакове схемотехнічне виконання перетворювачів електричної енергії СКЗ надає змогу мінімізувати відмінності між вихідними сигналами суміжних СКЗ, тим самим уникаючи різних миттєвих значень потенціалів, а отже звести до мінімуму їх різницю. Крім того уніфіковане рішення дає можливість припустити виключення факторів які впливають на систему із боку випрямляча, таких як різний коефіцієнт корисної дії та затримка на відкриття силових ключів.

Наступним методом є забезпечення однакових рівнів потужності, що надається станціями для захисту підземного сталевого трубопроводу. Таким

чином забезпечуються однакові амплітуди коливань потенціалу, що також мінімізує різницю потенціалів на суміжних станціях.

За умови виконання двох попередніх умов різниця потенціалів між станціями може утворюватися через відмінність фаз вихідних сигналів, що призводить до різних миттєвих значень. Підключення суміжних станцій катодного захисту до однієї й тієї ж фази живлення забезпечує мінімізацію впливу цього фактору.

Ще одним із можливих факторів, що помітно впливають на утворення захисного потенціалу на підземному трубопроводі є конструкція і матеріал анодного заземлення, які приймають участь в формуванні ланцюга СКЗ – ґрунт – трубопровід. Відповідно їх неоднорідність і різнотиповість впливає на величину струмів стікання / натікання, що в свою чергу впливають на загальну потужність СКЗ і співвідношення із струмами поверхнею трубопроводу.

Крім того, для забезпечення автоматизованого вирівнювання потенціалів можливо запропонувати алгоритми синхронізованої роботи силовими ключами суміжних станцій катодного захисту, основним завданням яких є забезпечення і підтримання якомога однакових рівнів потенціалів між станціями, тим самим мінімізуючи струми перетікання по трубопроводу.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні взаємозв’язку між режимами роботи станцій катодного захисту, які працюють спільно та є пов’язаними об’єктом захисту і струмами вирівняння, що протікають в підземним сталевим трубопроводом, а також у доведенні необхідності врахування впливу якості ізоляції під час формування значень потенціалу захисту високочастотною складовою сигналів СКЗ. Вперше запропоновано комплекс технічних і алгоритмічних рішень, які дозволяють цілеспрямовано мінімізувати різницю потенціалів у миттєвих значеннях вихідних сигналів СКЗ, тим самим зменшуючи значення струмів вирівнювання та корозійних ризиків у перехідних і позаштатних режимах.

Висновки.

Встановлено, що корозійні ризики, обумовлені взаємодією суміжних станцій катодного захисту ,які є гальванічно пов’язаними об’єктом захисту, значною мірою визначаються співвідношенням між струмами стікання/натікання та струмами, що перетікають поверхнею трубопроводу. Показано, що для трубопроводів із новою або якісною ізоляцією домінуючий вплив на інтенсивність корозійних процесів мають високочастотні складові сигналу СКЗ, тоді як для зношеної ізоляції — спектральний склад не є критичним. Доведено, що мінімізація різниця потенціалів між суміжними СКЗ дозволяє зменшити струми міжстанційного перетікання і забезпечити стабільніші умови катодного захисту навіть у режимах часткового блєкауту, тим самим підвищуючи довговічність підземних сталевих трубопроводів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. План Розвитку Газотранспортної Системи Тов "Оператор ГТС України" на 2021 – 2030 роки, Київ 2020, https://tsoua.com/wp-content/uploads/2020/10/TYNDP-2021-2030-TSO-4.1.pdf
2. Протяжність та структура власності газорозподільних систем, https://map.ua-energy.org/uk/resources/8ff9aac6-34e1-4932-ae4f-97f3896aed29/?_ga=2.244269381.1360191742.1718703785-274564711.1718703058
3. Peabody, A.W. (1978). Control of Pipeline Corrosion.
4. Aziukovskyi, O O; Pivniak, H H; Babenko, M V; Shykhov, S K Influence of the protective potential distribution of a steel underground pipeline on electrochemical corrosion processes, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2025, (2): 155 – 163. https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1921-2025/content-2-2025/7186-155
5. Aziukovskyi O., Papaika Y., Podoltsev O., Babenko M., Shykhov S. SIMULATION OF THE OPERATION MODES OF THE CATODIC PROTECTION COMPLEX OF PIPELINES IN THE APPROACH OF OVERHEAD POWER LINES [Моделювання режимів роботи комплексу катодного захисту трубопроводів при переході повітряних ліній електропередач] (2024) Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (6), pp. 73 - 78. DOI: 10.33271/nvngu/2024-6/073. http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85213868119&partnerID=MN8TOARS
6. ДСТУ Б В.2.5-29:2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Системи газопостачання. Газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії. [Чинний від 2007-02-01]. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2007. 119 с.
7. Азюковський, О. О., & Шихов, С. К. (2024). СТАНЦІЇ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЯК ДЖЕРЕЛА ПОЛІГАРМОНІЙНИХ СИГНАЛІВ. Електротехнічні та інформаційні системи, (106), 15–19. https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/eis/article/view/676
8. O. Aziukovskyi, S.Shykhov Formation of the protective potential of underground steel pipelines in the context of the development of modern converter technologies, Coll.res.pap.nat.min.univ. 2024, 79:210–221. https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/7d2e8d03-49b7-4952-b431-38f8bd2ef423/content

28УДК 004.89:621.314

Д.В. Файнштейн[1], Г.Г. Дяченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЯК ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ МІКРОГРІД-СИСТЕМ

Анотація. Розглянуто питання підвищення ефективності промислових мікрогрід-систем шляхом застосування цифрових двійників. Наведено структуру цифрового двійника мікрогрід-системи та визначено основні вимоги до його побудови. Розроблювані рішення спрямовані на зменшення енергоспоживання, зниження пікових навантажень у локальних енергомережах, підвищення надійності роботи обладнання та зменшення залежності промисловості від традиційних енергоносіїв.

***Ключові слова**: цифровий двійник, SmartGrid, мікрогрід, енергоефективність, Industry 4.0, предиктивне керування.*

Вступ. Сучасна енергетика зазнає значних змін у зв’язку з переходом до децентралізованих систем, широким впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та цифрових технологій. Однією з ключових проблем таких систем є нестабільність режимів роботи, викликана стохастичною природою генерації відновлюваних джерел енергії, нерівномірністю навантажень і взаємодією великої кількості автономних елементів [1–3].

У цих умовах особливого значення набувають системи прогнозування та попередження критичних режимів експлуатації, які здатні забезпечити безперервність енергопостачання, підвищити надійність і енергоефективність мікрогрід-систем. Використання технології цифрових двійників відкриває нові можливості для моніторингу, моделювання та прогнозування поведінки енергетичних об’єктів у реальному часі [4–6].

Постановка задачі. Метою роботи є підвищення ефективності промислових мікрогрід-систем шляхом створення цифрових двійників, здатних до моніторингу, прогнозування та оптимізації режимів у реальному часі. В свою чергу це потребує формування вимог до побудови цифрових двійників.

Основний зміст роботи. Цифровий двійник – це складна система, що складається з трьох основних компонентів: фізичний об’єкт або система – реальний елемент мікрогрід, який відстежується (обладнання, енергосистема); віртуальний об’єкт або модель – цифрова копія, що відтворює поведінку фізичного об’єкта в режимі реального часу; зв’язок між ними – IoT платформи, сенсори, протоколи передачі даних, які забезпечують збір, передачу та синхронізацію інформації. Таким чином, цифровий двійник розглядається як інтегрована віртуальна модель, яка відтворює реальні процеси промислового об’єкта в реальному часі на основі даних IoT-сенсорів та алгоритмів обробки великих даних.

У контексті промислових мікрогрід-систем цифровий двійник виступає ключовим інструментом для енергоефективного керування розподіленими джерелами, балансування навантажень і підтримки стабільності напруги. Його застосування дозволяє здійснювати аналіз “what-if” сценаріїв без ризику для фізичної системи, що є особливо важливим для виробничих об’єктів з високими вимогами до безперервності живлення.

Таблиця 1

Ключові вимоги до розробки та експлуатації цифрових двійників мікрогрід-систем

Вимога	Критерій виконання	Метод перевірки
Адекватність моделі	Відхилення моделі від реальних вимірювань не перевищує 2–5%	Порівняння результатів цифрового двійника із даними сенсорів у реальному часі
Модульність та масштабованість архітектури	Можливість додавання/вилучення вузлів без реконфігурації та деградації продуктивності	Тестування сценаріїв підключення нових елементів
Інтероперабельність	Підтримка стандартів IEC 61850, Modbus, MQTT, OPC UA	Верифікація обміну даними з реальними пристроями
Синхронізація у реальному часі	Оновлення даних з частотою не більше 1–10 Гц	Тестові симуляції з часовими затримками
Прогнозування режимів	Коректність прогнозу >90% для ключових параметрів	Порівняння прогнозів із фактичними даними за історією
Оптимізація керування	Мінімізація енергетичних втрат або витрат >5% порівняно з базовим режимом	Експериментальні випробування з MPC або AI-контролером
Якість даних	Повнота, точність, синхронність часових рядів	Алгоритми фільтрації, нормалізації, валідації
Надійність і відмовостійкість	Безперервність роботи при збоях комунікації >99% часу	Імітація аварійних сценаріїв (відключення вузлів, каналів)
Кібербезпека	Захищений канал передачі, контроль доступу, журнал дій	Реалізація TLS/SSL, аутентифікації, логування подій
Валідація цифрового двійника	Узгодженість динаміки реальної та віртуальної системи	Порівняння графіків струмів, напруг, потужностей
Інтеграція з системами керування	Сумісність з EMS/BMS/SCADA	Випробування через API або протокол IEC 61850
Адаптація та самонавчання	Автоматичне оновлення параметрів моделі на основі реальних даних	Алгоритми online learning або ML-рекалібрування
Відповідність стандартам	Виконання вимог IEC 62832, IEC 61850, IEEE 2030.7 / 2030.8, ISO/IEC 30182, EU Digital Twin Energy Initiative	Аудит технічної документації

Ключові вимоги до цифрових двійників мікрогрід-систем охоплюють точність моделі, синхронізацію у реальному часі, інтероперабельність, кіберзахист та енергоефективність керування. Їх перевірка здійснюється через експериментальні симуляції, аудит стандартів і аналіз відхилень між віртуальною та реальною системами. У таблиці 1 дано систематизований перелік із поясненнями за структурою: вимога, критерій виконання, метод перевірки.

При створені засобів моніторингу й управління використовується методологію побудови IoT-систем, що включає сенсорні вузли, комунікаційні протоколи, хмарні сервіси для зберігання та аналізу даних.

Для розв'язання задач аналізу та моделювання передбачається використання компонентно-орієнтованого підходу. При цьому застосовуються методи диференціальних рівнянь, оптимізації та моделювання складних динамічних систем у таких середовищах MATLAB/Simulink та/або Python. Енергетичні процеси в промислових системах можуть бути представлені як багатовимірні нелінійні динамічні системи з обмеженнями на ресурси та технічні характеристики обладнання.

Для оптимізації процесів у промислових мікрогрід-системах цифровий двійник може інтегруватися з методами предиктивного керування (Model Predictive Control, MPC). Це забезпечує використання даних із віртуальної моделі для передбачення майбутніх станів системи та формування оптимальних керуючих дій з урахуванням багатокритеріальних обмежень у режимі реального часу. Поєднання MPC з методами машинного навчання (зокрема, рекурентними нейронними мережами або LSTM) підвищує точність прогнозів і адаптивність системи до змін навантаження.

Наукова новизна полягає у формалізації та систематизації вимог до цифрових двійників промислових мікрогрід-систем, що забезпечують підвищення енергоефективності, надійності та прогнозованості їх роботи. Запропоновано структурований перелік вимог із критеріями виконання та методами перевірки, який може бути використаний як база для розроблення нормативних документів і технічних завдань на створення цифрових двійників у промисловій енергетиці. Обґрунтовано інтеграцію підходів предиктивного керування та машинного навчання до моделі цифрового двійника для реалізації проактивного енергоменеджменту.

Висновки. У роботі обґрунтовано та систематизовано ключові вимоги до цифрових двійників промислових мікрогрід-систем, включно з технічними, функціональними та безпековими аспектами. Наведено узагальнену таблицю критеріїв і методів перевірки, що дозволяє оцінювати якість побудови цифрових двійників на різних етапах їх життєвого циклу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhou, B., Zou, J., Chung, C. Y., Wang, H., Liu, N., Voropai, N., Xu, D. Multi-microgrid energy management systems: architecture, communication, and scheduling strategies. *Journal of Modern*

Power Systems and Clean Energy. 2021, Vol. 9 (3), P. 463–476. https://doi.org/10.35833/mpce.2019.000237.
2. Prianka, Y. M., Sharma, A., Biswas, C. Integration of renewable energy, microgrids, and ev charging infrastructure: challenges and solutions. *Control Systems and Optimization Letters*. 2024, Vol. 2 (3), P. 317–326. https://doi.org/10.59247/csol.v2i3.142.
3. Papaika, Y., Lysenko, O., Malyshko, M., Udovyk, O. Determination of voltage quality indicators in industrial power supply systems with limited energy system capacity. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 2024, (3), P. 36–44. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-4.
4. Aghazadeh Ardebili, A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H. A., Longo, A., Ficarella, A. Digital twins of smart energy systems: A systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. *Energy Informatics*. 2024, Vol. 7 (1), 94. https://doi.org/10.1186/s42162-024-00385-5.
5. Heluany, J. B., Gkioulos, V. A review on digital twins for power generation and distribution. International *Journal of Information Security*. 2024, Vol. 23 (2), P. 1171–1195. https://doi.org/10.1007/s10207-023-00784-x.
6. Sajadieh, S. M. M., & Noh, S. D. From simulation to autonomy: Reviews of the integration of artificial intelligence and digital twins. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2025, Vol. 12 (5), P. 1597–1628. https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z.

УДК 621.316

О.В. Литвинчук[1], Г.С. Олішевський[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРОЄКТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО IOT-МОДУЛЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА БАЗІ ESP32 ТА HLW8012

Анотація. У тезах представлено концепцію створення інтелектуальної IoT-модуля для вимірювання параметрів електроспоживання та передавання телеметрії у хмарні сервіси. Проєкт базується на використанні мікроконтролера ESP32 та енергетичного датчика HLW8012, що дозволяє оцінювати напругу, струм та активну потужність. Запропоновано перспективну архітектуру апаратно-програмного комплексу, що може стати елементом цифрової інфраструктури Smart Grid та Smart Home.

***Ключові слова**: IoT, smart socket, ESP32, HLW8012, енергомоніторинг.*

Вступ. Цифровізація енергетики супроводжується зростанням попиту на компактні, економічні та автономні пристрої, здатні формувати потокові дані про стан локальних електричних мереж [1-5]. Такі IoT-модулі дозволяють отримувати точну та оперативну інформацію для систем керування навантаженням, енергетичної аналітики та прогнозування.

Запропонований проєкт передбачає створення універсального інтелектуального вимірювального модуля, що може інтегруватися в різні енергетичні об’єкти – від побутових пристроїв до промислових систем

енергоменеджменту, а також може виконувати роль базового елемента майбутніх Smart Grid систем.

Постановка задачі. Для створення IoT-модуля планується виконати такі завдання:

- Спроєктувати апаратну частину з використанням ESP32 та контролера HLW8012.
- Передбачити методики калібрування вимірювальних каналів та підвищення точності.
- Розробити концепцію програмного забезпечення з обробкою імпульсних сигналів HLW8012.
- Організувати передавання телеметрії через MQTT або HTTPS у хмарний сервіс.
- Сформувати архітектуру хмарної обробки, де дані з пристрою зберігатимуться та аналізуватимуться.
- Забезпечити можливість масштабування та інтеграції у більші системи цифрової енергетики.

Основний зміст роботи. Модуль базуватиметься на ESP32, який поєднує високу продуктивність, вбудовані комунікаційні інтерфейси та підтримку програмного середовища. Як сенсорний компонент використовується HLW8012, що формує імпульсні сигнали, пропорційні електричним параметрам мережі.

Для отримання коректних даних планується реалізувати:

- процедури калібрування на основі еталонних навантажень;
- цифрову фільтрацію та корекцію шумів;
- алгоритми обчислення миттєвої та середньої активної потужності;
- розрахунок загального енергоспоживання за імпульсними характеристиками.

Програмна частина передбачає створення кількох функціональних модулів:

- модуль обробки імпульсних сигналів HLW8012;
- модуль управління конфігураціями та параметрами пристрою;
- модуль мережевої взаємодії для відправлення даних у хмару.

На серверній стороні планується реалізувати: приймання даних від IoT-модуля; збереження телеметрії у базі даних; аналіз показників енергоспоживання; можливість формування прогнозів на основі накопичених даних.

Спроєктований модуль є універсальним та може бути встановлений у різні системи, де потрібний локальний енергетичний моніторинг.

Наукова новизна полягає у побудові концепції компактного IoT-модуля, який поєднує простоту апаратної реалізації з можливістю інтеграції у масштабовану хмарну інфраструктуру. У межах розробки пропонується:

- Модель обчислення енергоспоживання на базі імпульсних сигналів HLW8012.

- Підхід до організації хмарної аналітики даних від розподілених модулів.
- Застосування методів цифрової трансформації до вимірювальних пристроїв локального рівня.

Висновки. У роботі представлено проєкт інтелектуального IoT-модуля для моніторингу енергоспоживання на базі ESP32 та HLW8012. Модуль може бути інтегрований у системи цифрової енергетики, де потрібна достовірна телеметрія з локальних вузлів. Запропонована архітектура формує основу для створення прототипу, подальших експериментальних досліджень, а також впровадження алгоритмів оптимізації та прогнозування енергоспоживання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Espressif Systems. *ESP32 Technical Reference Manual.*
2. *HLW8012 Energy Metering IC Datasheet.*
3. Rojek Ł., Islam S., Hartmann M., Creutzburg R. IoT-based real-time monitoring system for a smart energy house. *Electronic Imaging.* 2021. No. 3. P. 38-1–38-10. DOI: 10.2352/ISSN.2470-1173.2021.3.MOBMU-038.
4. De Sousa E. L., Marques L. A. de A., de Lima I. S. F., Neves A. B. M. Development a low-cost wireless smart meter with power quality measurement for smart grid applications. DOI: 10.3390/s23167210.
5. Rind Y. M., Raza M. H., Zubair M., Mehmood M. Q. Smart energy meters for smart grids: an Internet of Things perspective. DOI: 10.3390/en16041974.

УДК 621.31

М.С. Кириченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ОДНОДІОДНОЇ МОДЕЛІ PV-МОДУЛЯ В СЕРЕДОВИЩІ PYTHON ДЛЯ ОЦІНКИ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ДАНИХ PVGIS

Анотація. Розглянуто застосування однодіодної моделі PV-модуля для оцінки генерації електричної енергії фотоелектричною станцією в середовищі Python з використанням бібліотеки *pvlib*. Наведено алгоритм і методи розрахунку параметрів однодіодної схеми заміщення для відтворення електричних характеристик фотоелектричного модуля. Моделювання базується на врахуванні метеорологічних даних сервісу Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) та дозволяє отримати погодинні, добові та помісячні значення генерації електроенергії сонячною електростанцією.

***Ключові слова**: однодіодна модель, фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, Python, PVGIS, генерація енергії.*

Вступ. За останнє десятиліття спостерігається стійка тенденція до зростання частки відновлюваних джерел енергії в загальному енергобалансі [1]. В Україні розвиток сонячної енергетики та систем розподіленої генерації набуває особливого значення в умовах постійних ворожих російських атак на енергетичну інфраструктуру. Цифрове моделювання процесів генерації енергії фотоелектричними станціями є важливою складовою, зокрема при проєктуванні систем енергозабезпечення. Найбільш поширеним базовим математичним описом роботи фотоелектричного модуля є однодіодна схема заміщення [2-5], яка імітує фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідниковому матеріалі фотоелемента під впливом сонячного випромінювання та температури. Аналогічний принцип моделювання використовується в програмному забезпеченні PVsyst, призначеному для проєктування сонячних електростанцій.

Постановка задачі. Метою роботи є створення цифрової моделі фотоелектричної станції на основі однодіодної схеми заміщення PV-модуля з використанням даних PVGIS та бібліотеки pvlib для оцінки генерації енергії. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- описати математичну структуру однодіодної моделі та визначити основні параметри (I_{ph}, I_0, R_s, R_{sh} та n);
- оцінити робочу температуру фотоелектричного модуля за методом Файмана (Faiman Module Temperature Model) з врахуванням швидкості вітру, температури навколишнього середовища, параметрів теплових втрат;
- реалізувати модель у середовищі Python з використанням бібліотеки pvlib;

- оцінити генерацію енергії фотоелектричної станції на основі погодинних даних інсоляції та температури.

Основний зміст роботи. Однодіодна модель фотоелектричного модуля базується на еквівалентній схемі заміщення (рис. 1) з п'ятьма параметрами (табл. 1) і описується рівнянням:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[exp\left(\frac{q(U+IR_s)}{nN_s k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{U+IR_s}{R_{sh}}. \quad (1)$$

Для формування моделі та розв'язування рівняння (1) використовується функція *singlediode()* та алгоритм *calcparams_desoto()*, що визначає п'ять значень параметрів, враховуючи інсоляцію та температуру комірки за методом Де Сото [6], які можуть бути використані для розрахунку вольт-амперної характеристики та точки максимальної потужності. Дані інсоляції, температури, швидкості вітру завантажуються з сервісу PVGIS для конкретного місця розташування об'єкта. Також враховується кут нахилу фотоелектричних модулів до горизонту (°) в залежності від широти місцевості та орієнтація панелей відносно сторін світу.

Робоча температура фотоелектричного модуля оцінюється за методом Файмана (Faiman Module Temperature Model) [7], що враховує вплив температури навколишнього середовища, швидкості вітру, інтенсивності опромінення та параметри теплових втрат.

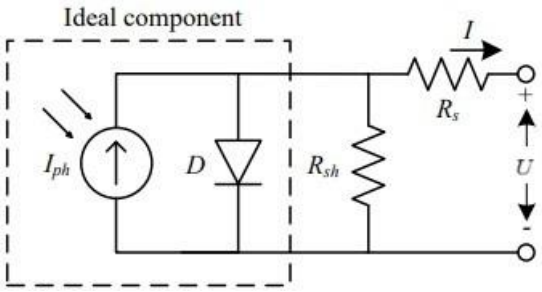


Рис. 1. Однодіодна еквівалентна схема заміщення фотоелектричного модуля

Отримані в результаті моделювання величини I_{ph}, I_0, R_s, R_{sh} та n дозволяють визначити точку максимальної потужності MPP (англ. Maximum Power Point), яка характеризує робочий режим фотоелектричного модуля за конкретних кліматичних умов. На основі отриманих погодинних значень потужності формується профіль генерації. Подальша агрегація результатів дозволяє отримати добові, місячні та річні обсяги виробництва енергії для одного модуля, а також виконати масштабування до будь-якої встановленої потужності сонячної електростанції.

Таблиця 1

Основні параметри однодіодної моделі

Параметр	Позначення	Фізичний зміст
Фотострум	I_{ph}	генерується під впливом сонячного випромінювання
Струм насичення діода	I_0	враховує рекомбінаційні втрати в p-n-переході
Послідовний опір	R_s	враховує опір контактів, провідників та напівпровідника
Шунтуючий опір	R_{sh}	імітує витоки струму через дефекти або край комірки
Коефіцієнт ідеальності діода	n	враховує неідеальність діода

Наукова новизна розробки полягає в поєднанні однодіодної фізичної моделі фотоелектричного модуля з відкритими метеорологічними даними сервісу PVGIS в середовищі Python. На відміну від використання програмного продукту PVsyst, призначеного для моделювання роботи тільки сонячних електростанцій, запропонований підхід забезпечує можливість гнучкої модифікації моделі (заміна температурних моделей, зміна параметрів однодіодної схеми заміщення) та оцінки роботи гібридних енергосистем з комплексними джерелами живлення.

Висновки. В результаті було розроблено скрипт у Python, який реалізує повний цикл моделювання: від отримання погодинних метеорологічних даних PVGIS до розрахунку погодинної, добової, помісячної генерації СЕС на основі п’ятипараметричної однодіодної моделі. Застосування моделі Де Сото забезпечило фізично обґрунтоване визначення параметрів з врахуванням температури та інсоляції. Масштабування від одного модуля до будь-якої встановленої потужності реалізовано визначенням необхідної кількості модулів за їх паспортною потужністю. Запропонований підхід забезпечує відкритість параметризації моделі та може бути використаний для оцінки генерації та аналізу режимів роботи гібридних енергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lutsenko I., Rukhlova N., Kyrychenko M., Tsyhan P., Panchenko V. (2023). Increasing the energy efficiency of modes of distribution networks with photovoltaic stations. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (1), 99-106. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/099
2. Batzelis, E. I. (2017). Simple PV performance equations theoretically well founded on the single-diode model. IEEE Journal of Photovoltaics, 7(5), 1400-1409. https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2711431
3. Hussein, A. (2017). A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 4431-4444. doi: https://doi.org/10.3906/elk-1703-14.

4. Ali Naci Celik, Nasır Acikgoz. (2007). Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. Applied Energy, Volume 84, Issue 1, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.04.007.
5. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі [Електронний ресурс]: підручник / О. Ю. Гаєвський. – Електрон. текстові дані (1 файл: 5,57 Мб). – Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. – 150 с. – Назва з екрана. URL: https://ela.kpi.ua/items/59eff7d9-0384-4526-b36a-fb3ee6e3b239 (дата звернення: 10.11.2025)
6. W. De Soto et al. (2006) Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, vol 80, pp. 78-88.
7. Faiman, D. (2008). Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules. Progress in Photovoltaics 16(4): 307-315.

УДК 621.311.24

Ю.А. Папаїка[1], В.С. Пушков[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ МІКРОМЕРЕЖАМИ З ВДЕ

Анотація. Робота присвячена підходам до створення інтелектуальних мікромереж з ВДЕ для підвищення автономності та надійності критичної інфраструктури шляхом застосування прогнозних моделей та цифрових технологій.

Ключові слова: *інтелектуальні мікромережі, критична інфраструктура, відновлювальні джерела енергії, енергетичні накопичувачі, прогнозування навантаження, енергетична безпека, автономна робота.*

Стрімкий розвиток відновлювальних джерел енергії та необхідність забезпечення високого рівня надійності критично важливих об’єктів формують підґрунтя для створення інтелектуальних електричних мікромереж нового покоління. Сучасні вимоги до енергетичної незалежності, гнучкості та стійкості інфраструктури зумовлюють потребу у впровадженні автономних енергетичних систем, здатних ефективно функціонувати в умовах нестабільності централізованих мереж. Особливої **актуальності** ця проблематика набуває у зв’язку зі зростанням частки ВДЕ, які, попри екологічні та економічні переваги, характеризуються стохастичною природою та потребують застосування методів прогнозування, оптимізації й автоматизованого керування [1].

Метою даної роботи є дослідження концепцій побудови інтелектуальних мікромереж з використанням ВДЕ, оцінка їх ефективності в умовах автономної роботи та обґрунтування переваг застосування цифрових і прогнозних технологій для забезпечення стійкості критичної інфраструктури. **Об’єктом дослідження** виступає інтелектуальна електрична мікромережа як система, що поєднує генерацію, накопичення, розподіл енергії та інтелектуальні моделі

керування. Предметом дослідження є процеси прогнозування, оптимізації та автономного функціонування мікромережі при високій частці ВДЕ та нерівномірних режимах навантаження.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі **задачі**:

- аналіз сучасного стану та перспектив розвитку інтелектуальних мікромереж для об’єктів критичної інфраструктури;
- дослідження методів прогнозування генерації та споживання електроенергії на основі машинного та глибинного навчання;
- оцінка ефективності технологій оптимального керування накопичувачами енергії;
- вивчення потенціалу мультиагентних систем для підвищення автономності й живучості мікромережі;
- аналіз відмовостійкості в умовах ізоляції від централізованої мережі [1-2].

Інтелектуальні мікромережі дають можливість інтегрувати ВДЕ з накопичувачами та адаптивними системами споживання в єдиний цифровий енергетичний контур. Одним із ключових напрямів розвитку таких систем є поєднання генерації з передовими технологіями акумулювання, які забезпечують можливість балансування енергопотоків і підтримання стабільної роботи у випадку обмеження або повної втрати зовнішнього електроживлення. Ефективна експлуатація цих накопичувачів потребує застосування алгоритмів оптимального керування, що враховують режими заряджання й розряджання, деградаційні процеси та пріоритетність живлення критичних споживачів [1].

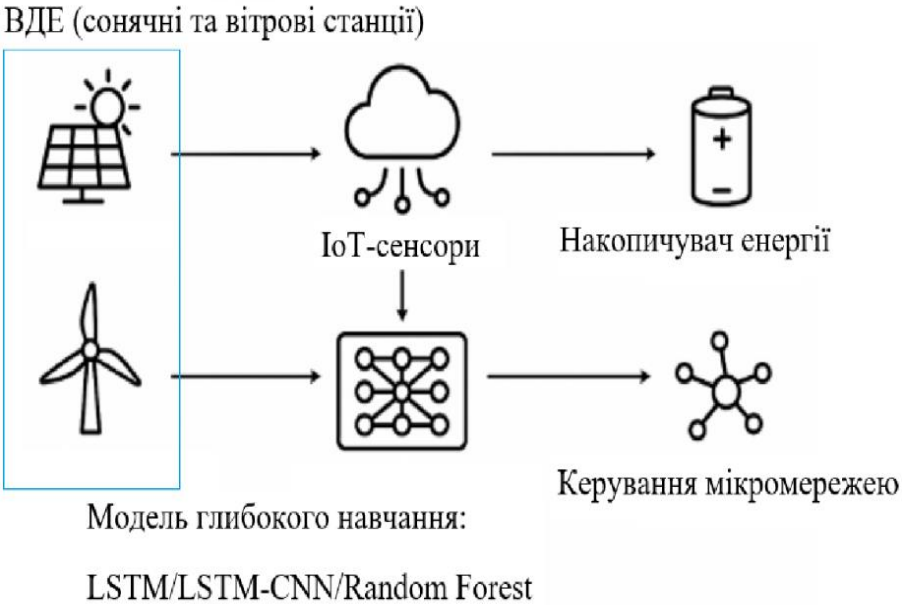


Рис. 1. Обрана концепція керування даними у системі ВДЕ-інтелектуальні мережі

Цифрова інфраструктура інтелектуальних мікромереж базується на використанні численних IoT-сенсорів, що фіксують параметри роботи системи в реальному часі, такі як: рівень генерації, споживання, погодні умови, температуру обладнання та можливі відхилення у його роботі. На основі цих даних застосовуються сучасні алгоритми штучного інтелекту, які дають змогу прогнозувати генерацію енергії та навантаження з високою точністю. До таких алгоритмів належать моделі, орієнтовані на роботу з часовими рядами (наприклад, LSTM), комбіновані моделі глибинного навчання (етап обробки зображень або сигналів може виконуватися за допомогою CNN), а також підходи, що об'єднують багато простіших моделей у одну узгоджену систему для покращення точності прогнозу. Окремо важливим напрямом стає застосування методів підкріплювального навчання, які дозволяють мікромережі самостійно підбирати оптимальні алгоритми керування енергетичними потоками й адаптуватися до змін у зовнішніх умовах без ручного втручання.

Мультиагентні системи відіграють ключову роль в інтелектуальних мікромережах, оскільки дозволяють кожному елементу – генератору, накопичувачу, споживачу чи сенсору – працювати як автономному агенту з власною логікою дій. Такий підхід підвищує стійкість мікромережі, зменшує залежність від центрального контролера та забезпечує швидку реакцію на аварійні ситуації, що особливо важливо для критичної інфраструктури.

Забезпечення кібербезпеки є одним із найскладніших завдань інтелектуальних мікромереж, оскільки цифровізація відкриває нові вектори атак. Для стабільної роботи потрібні системи виявлення аномалій, захист комунікацій та сегментація мережі для локалізації загроз. Особливо важливим є режим ізольованої роботи, коли мікромережа повинна самостійно підтримувати частоту, напругу та баланс генерації й споживання за обмежених ресурсів.

Висновки. Інтелектуальні мікромережі з ВДЕ є ключовим напрямом розвитку енергетики, забезпечуючи автономність, стійкість і гнучке енергопостачання для об'єктів критичної інфраструктури. Їхнє впровадження підвищує енергетичну безпеку та зменшує залежність від централізованих мереж, що особливо важливо в умовах нестабільності. Подальші дослідження мають зосереджуватися на покращенні прогнозних алгоритмів, підвищенні відмовостійкості й створенні універсальних платформ мультиагентного керування для інтеграції різнорідних компонентів у єдиний інтелектуальний енергетичний комплекс.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Інноваційні джерела енергії: навч. посіб. / О.О. Азюковський,Д.В. Ципленков, О.В. Бобров, Н.С. Дрешпак, С.І. Федоров; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ "ДП", 2024. – 336 с.
2. Альтернативні джерела енергії та технології їх використання: підруч. / Клименко В. В., Солдатенко В. П., Плєшков С. П., Скрипник О. В., Саченко А.І.;– М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький :, 2023. – 268с.

УДК 621.314

Д.С. Зибалов[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОДИ ПОШУКУ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Анотація. У цій роботі розглянуто методи пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP) для сонячних фотоелектричних перетворювачів (СФП, Solar Photovoltaic Converter, SPC) та їх вплив на ефективність роботи системи. Особлива увага приділена алгоритмам пошукового типу, зокрема «крокуй і спостерігай» (Perturb and Observe, P&O) та інкрементної провідності (Incremental Conductance, INC), які аналізують зміни потужності відносно напруги або струму й дозволяють адаптивно реагувати на зміну умов освітленості. Також розглянуто методи, що базуються на фракційному співвідношенні напруги відкритого кола (Fractional Open-Circuit Voltage, FOCV), фракційному струмі короткого замикання (Fractional Short-Circuit Current, FSCC) та повному скануванні робочого діапазону напруги (Scanning/Sweep), які дозволяють оцінювати MPP за емпіричними співвідношеннями або безпосередньо вимірювати його. У роботі проаналізовано алгоритмічні особливості цих методів, їх практичну ефективність та застосування для забезпечення стабільного і максимально продуктивного функціонування СФП.

***Ключові слова**: сонячний фотоелектричний перетворювач, точка максимальної потужності, крокуй і спостерігай, метод інкрементної провідності.*

Вступ. 24 лютого 2022 року в Україні розпочалася повномасштабна війна, яка спричинила масштабні руйнування енергетичної інфраструктури, знищення генерувальних потужностей та пошкодження систем передачі електроенергії. У результаті регулярних обстрілів енергетичних об’єктів виник дефіцит електроенергії, часті аварійні відключення та тривалі перебої у централізованому енергопостачанні. Це зумовило активний перехід населення, підприємств і критичних об’єктів на автономні джерела живлення, серед яких провідне місце посіли сонячні фотоелектричні перетворювачі (СФП). Сонячна енергетика стала одним із найефективніших напрямів забезпечення енергетичної незалежності, проте її використання супроводжується низкою технічних труднощів. Одним із головних недоліків СФП є залежність вихідної потужності від умов освітленості, температури та потужності підключеного навантаження. Причому коливання температури чи погодні умови можуть зменшити ефективність роботи системи на 70%. В свою чергу неправильний відбір енергії може зменшити ефективність роботи СФП практично до нуля. Тому були розроблені алгоритми пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP). Якщо система працює поза цією точкою, ефективність перетворення енергії значно знижується. Оскільки інтенсивність сонячного випромінювання постійно змінюється, необхідно забезпечити автоматичне слідування за MPP у реальному часі. Для цього використовуються методи пошуку точки максимальної потужності (Maximum Power Point Tracking, MPPT), які за допомогою зміни робочої напруги

або струму навантаження СФП забезпечують максимальний режим генерації. У наукових дослідженнях і практичних застосуваннях поширення набули алгоритми пошукового типу, зокрема метод «крокуй і спостерігай» (Perturb and Observe) та метод інкрементної провідності (Incremental Conductance). Вони базуються на аналізі змін потужності відносно варіацій напруги або струму та дозволяють системі адаптивно реагувати на коливання сонячної інсоляції. У сучасних умовах в Україні підвищується потреба у стабільних, автономних і надійних системах енергопостачання. Тому дослідження методів MPPT набуває стратегічного значення, оскільки дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії СФП і забезпечити безперервне енергопостачання. У цій роботі здійснено аналіз методів пошукового типу для виявлення MPP, алгоритмічної структури та практичних аспектів застосування в умовах енергетичної нестабільності, спричиненої бойовими діями на території України.

Постановка задачі. СФП генерують електричну енергію, потужність якої залежить від рівня сонячної інсоляції, температури, кута падіння сонячних променів на поверхню СФП, метеоумов та параметрів підключеного навантаження. При змінних зовнішніх умовах генерована потужність СФП може відхилятися від точки максимальної потужності, що призводить до значних втрат енергії та зниження ефективності системи. Метою дослідження є аналіз методів пошуку MPP, які дозволяють підтримувати оптимальний режим роботи СФП у реальному часі та пошук оптимального. Задача полягає у виявленні алгоритмів, здатних адаптивно реагувати на зміну умов освітленості та навантаження, порівнянні ефективності різних методів пошукового типу, включаючи P&O, INC, фракційного співвідношення напруги відкритого кола (Fractional Open-Circuit Voltage, FOCV, FSCC, Scanning, оцінці швидкості реагування алгоритмів та стабільності підтримання MPP, а також розробці рекомендацій щодо практичного застосування методів MPPT для підвищення ефективності роботи СФП у реальних умовах експлуатації. Розв’язання поставленої задачі дозволить забезпечити стабільну генерацію електроенергії сонячними системами та підвищити їх ефективність при динамічних змінах зовнішніх факторів.

Основний зміст роботи. Для підтримання максимальної потужності СФП треба забезпечити, щоб добуток вихідної напруги та струму досягав свого максимального значення [1-4]. Це реалізується шляхом динамічного відстеження MPP, яка змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, температури фотоелементів, кута падіння променів та опору навантаження [4]. На рисунку 1 приведено графік залежності генерованої потужності СФП від опору навантаження.

Розроблена вимірювальна система [2] змінювала опір навантаження та фіксувала значення добутку напруги та струму. Усі значення зчитувалися в реальному часі, після чого проходили первинну фільтрацію на апаратному рівні та зберігалися у текстовому файлі на ПК для подальшої обробки.

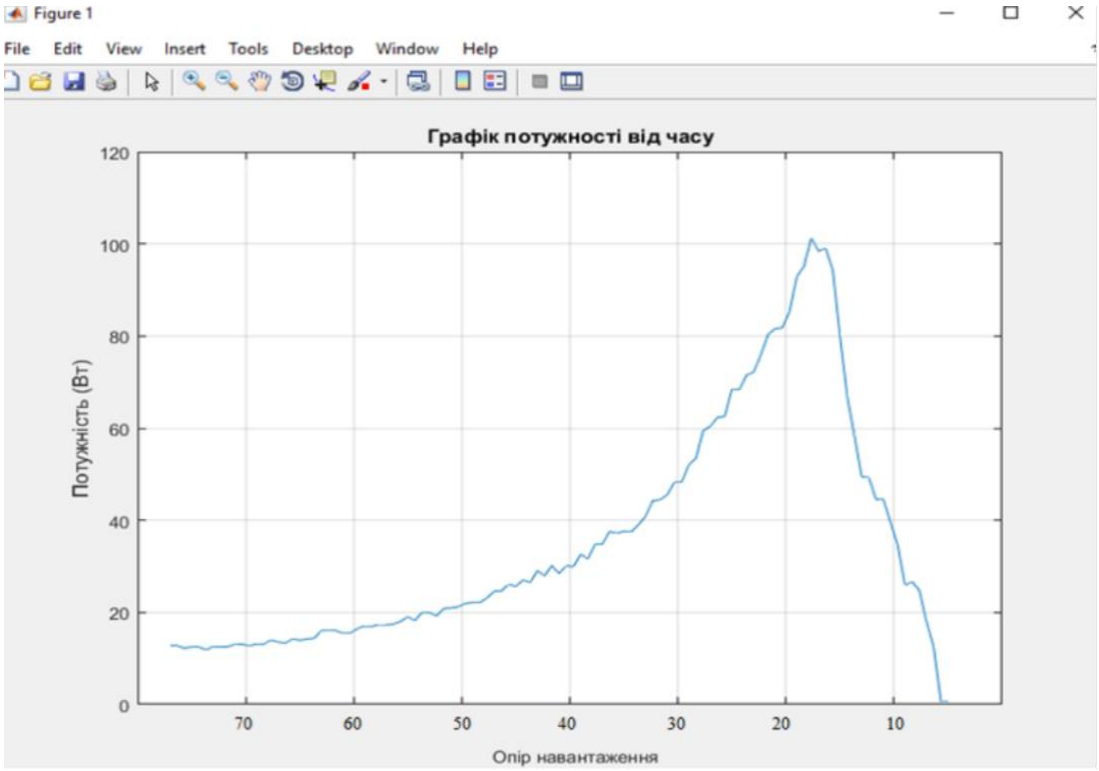


Рис. 1. Залежність генерованої потужності СФП від опору навантаження

Отримані експериментальні дані підтвердили наявність чітко вираженої MPP та показали, що положення цієї точки істотно змінюється залежно від умов освітлення і температури, що робить роботу СФП надзвичайно динамічною. Це засвідчило недостатність використання фіксованих режимів навантаження та актуальність застосування спеціалізованих алгоритмів, здатних забезпечувати адаптивний пошук оптимальної робочої точки в режимі реального часу. Такий висновок створює необхідність детального аналізу наявних підходів до відстеження MPP, оскільки саме від вибору алгоритму MPPT залежить ефективність подальшого керування енергетичною системою. У зв’язку з цим доцільно провести огляд існуючих методів пошуку MPP, розглянувши їх принципи роботи, переваги, обмеження та можливості застосування у сучасних фотоенергетичних системах.

Метод збурення та спостереження (Perturb and Observe, P&O) [3] є одним із фундаментальних підходів до відстеження MPP фотоелектричних модулів і ґрунтується на оцінці локального градієнта функції потужності від напруги. Суть методу полягає у навмисному введенні малого збурення робочої напруги або струму та подальшому аналізі зміни миттєвої потужності. Якщо після збурення потужність зростає, система робить висновок, що напрям зміни обрано вірно, і продовжує рух у цьому ж напрямі. Якщо потужність зменшується, напрям коригування змінює напрямок. Критичним фізичним підґрунтям цього методу є зміна знаку похідної dP/dV при переході через точку максимальної потужності. Недоліком метода є невеликі пульсації вихідної потужності.

Метод інкрементальної провідності (Incremental Conductance, IncCond) порівнює миттєву потужність з інкрементною dI/dV. Оскільки потужність визначається добутком струму і напруги, то похідна повної потужності набуває вигляду $\frac{dP}{dV} = I + V * \frac{dI}{dV}$. У MPP похідна потужності дорівнює нулю $dP/dV = 0$, а похідна струму $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$. До MPP похідна струму $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$, а після $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$. Таким чином, алгоритм визначає фактичний напрям руху до MPP завдяки аналізу зміни напруги та струму між тактами. Цей метод відрізняється високою точністю та стійкістю до швидких змін освітлення, що робить його одним із найбільш ефективних.

Метод дробової напруги розімкненого кола (Fractional Open-Circuit Voltage, FOCV) реалізує емпіричну залежність між напругою холостого ходу та напругою в точці максимальної потужності, що описується співвідношенням $V_{MPP} = k * V$, де коефіцієнт пропорційності k зазвичай дорівнює 0.70–0.80 для кремнієвих СФП. Для визначення V система на дуже короткий проміжок часу відключає навантаження, після чого налаштовує робочу напругу як частку виміряної напруги холостого ходу. Метод є простим у реалізації та не потребує обчислення похідних або аналізу миттєвих змін потужності, проте має нижчу точність і викликає втрати енергії через необхідність періодичного розмикання кола.

Метод дробового струму короткого замикання (Fractional Short-Circuit Current, FSCC) використовує співвідношення між струмом короткого замикання та струмом у MPP $I_{MPP} = k * I$, де коефіцієнт k зазвичай становить 0.90–0.98. Для вимірювання I ланцюг СФП на дуже короткий час замикається на шунт, після чого система встановлює необхідний робочий струм як пропорційну частку від I. Метод добре реагує на зміну інсоляції, оскільки струм короткого замикання близький до лінійної залежності від освітленості, проте, як і в методі FOCV, відбуваються втрати потужності під час вимірювальних циклів.

Сканувальний метод (Scanning MPPT) виконує дослідження вольт-амперної характеристики або характеристики потужності СФП. Алгоритм послідовно змінює робочу напругу у заданому діапазоні, вимірює відповідний струм і обчислює потужність у кожній точці, після чого визначає напругу, за якої потужність є максимальною. Такий метод забезпечує найвищу точність і здатний коректно працювати при наявності множинних локальних максимумів, особливо в умовах часткового затінення. Проте він має підвищені енергетичні витрати під час отримання характеристик і низьку швидкодію при різких змінах навколишніх умов, оскільки повний цикл сканування займає певний час.

Для дослідження методів MPP була створена програма в пакеті MATLAB результат роботи якої зображено на рисунку 2.

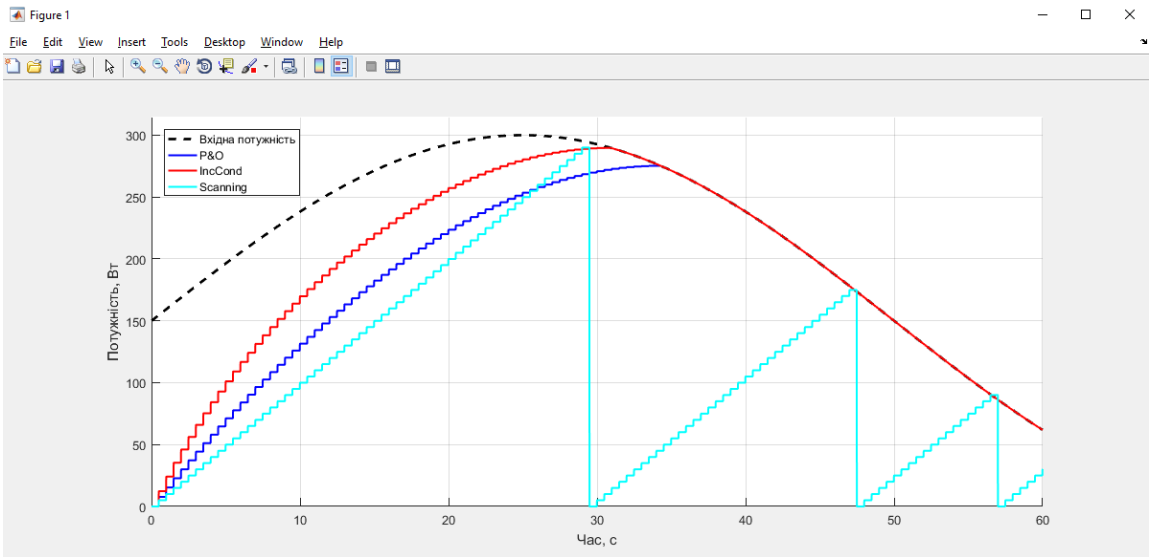


Рис. 2. Математична модель обробки користувацьких команд прошивкою

У цій симуляції порівнювались алгоритми P&O, IncCond та Scanning. На вхід подавався синусоїдальний сигнал потужності, що моделює змінне освітлення. У програмі задається крок дискретизації та тривалість симуляції. Вхідна потужність визначається як синусоїдальна функція (рис.3). Така реалізація дозволяє імітувати змінну сонячну інсоляцію.

```
% --- Параметри симуляції ---
dt = 0.01; t_end = 60;
t = 0:dt:t_end; n = length(t);

% --- Вхідна потужність ---
P_input = 150 + 150*sin(2*pi*0.01*t);
```

Рис. 3. Фрагмент програми

Для кожного алгоритму створюються окремі масиви потужності. Алгоритм P&O змінює напругу на навантаженні невеликими кроками та слідкує, в якому напрямку змінювати значення напруги, щоб потужність збільшувалася. Алгоритм IncCond порівнює миттєву потужність з інкрементною і визначає фактичний напрям руху до MPP завдяки аналізу зміни напруги та струму між тактами.

Алгоритм Scanning вимірює потужність через фіксований крок до досягнення поточного значення вхідної потужності для побудови ВАХ та визначення MPP. При зменшенні вихідної потужності від встановленої алгоритм перебудовує ВАХ і находить нову точку MPP.

Візуалізація здійснюється в одній системі координат. Генерована СФП потужність позначена пунктирною чорною лінією, а вихід кожного алгоритму – кольоровими лініями. На графіку наочно видно дискретні кроки P&O, IncCond та алгоритма Scanning .

Наукова новизна цієї роботи полягає в інтегрованому підході до порівняльного аналізу динамічної поведінки різних MPPT алгоритмів на змінному синусоїдальному джерелі потужності, що моделює реальні умови роботи фотогальванічних систем.

Запропонований підхід демонструє можливість використання простого синусоїдального сигналу для апроксимації складних реальних умов, що відкриває перспективу швидкого тестування та оптимізації алгоритмів пошуку MPP без складних експериментальних стендів.

Висновки. Дослідження показало, що алгоритми P&O та IncCond забезпечують адаптивне наближення до точки максимальної потужності з вираженими дискретними кроками. Результат роботи алгоритмів P&O та IncCond співпадає. Відмінність лише в методиці досягнення результату. Алгоритм Scanning ефективний для визначення MPP у межах фіксованих кроків потужності, проте його робота супроводжується циклічними скиданнями накопиченої потужності, що може призводити до короткочасних втрат енергії при різких коливаннях вхідного сигналу. Для регіонів з хмарністю такий метод не підходить. Отже, запропонований порівняльний підхід дозволяє не лише кількісно оцінити ефективність різних алгоритмів MPPT, а й виявити особливості їхньої динамічної поведінки, що має практичне значення для оптимізації керування фотогальванічними системами у реальних умовах змінного сонячного випромінювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. O. Zaslavsky, V. Tkachov, and K. Sosnin, “Improving the efficiency of electrical energy distribution with decentralized electric heating control based on nash equilibrium”, EEJET, vol. 5, no. 8 (107), pp. 17–23, Oct. 2020. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213492 (Scopus)
2. Зибалов Д.С. Дослідження впливу на згенеровану потужність кута падіння сонячних променів на поверхню сонячного фотоелектричного перетворювача. Енергетика і автоматика, №5 2022 р. https://doi.org 10.31548/energiya2022.05.062
3. Katche, M. L. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems. Energies, 16(5), 2206. https://doi.org/10.3390/en16052206.
4. Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M., & Dash, S. K. (2016). Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1018–1034. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.068.

УДК 621.315

В.В. Сіданченко[1], М.М. Руденко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА НЕГАУССІВСЬКА ПРИРОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ (БЕЛЬГІЯ, ПОЛЬЩА, 2015–2025)

Анотація. У роботі досліджено часові ряди електричного навантаження енергосистем Європи на основі даних платформи ENTSO-E у період 2015-2025 рр. Виконано фрактальний аналіз, розраховано показник Херста, фрактальну розмірність, кореляційну ентропію та розмірність фазового простору. Показано, що навантаження енергосистем Бельгії та Польщі, демонструє довготривалу пам'ять та має негауссівську природу. Це свідчить про доцільність розгляду фрактально-орієнтованих моделей для побудови точних прогнозів часових рядів даних про навантаження.

***Ключові слова**: фрактальний аналіз, навантаження енергосистеми, показник Херста, фрактальна розмірність, нелінійна динаміка, довга пам'ять, прогнозування.*

Вступ. Електричні енергосистеми характеризуються високою складністю та наявністю нелінійних, багатовимірних процесів. Через збільшення частки нестабільних джерел генерації та зростання динамічності споживання традиційні статистичні моделі прогнозування (зокрема, ARIMA, Holt-Winters та ін.) дедалі частіше демонструють недостатню точність та достовірність.

Метою даної роботи є дослідження часових рядів даних про навантаження на наявність фрактальної та негауссівської природи електричного навантаження, що дозволить обґрунтувати необхідність застосування нових методів прогнозування адекватних характеру досліджуваних процесів.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- За допомогою API transparency platform ENTSO-E отримати часові ряди за період 2015-2025рр. [1-4];
- оцінити показник Херста та фрактальну розмірність [5];
- визначити кореляційну ентропію;
- встановити наявність довготривалої пам'яті, самоподібності та масштабної інваріантності;
- оцінити відхилення від гауссівських моделей;
- обґрунтувати фрактальну природу електричного навантаження.

Основний зміст роботи. У роботі були використані такі інструменти:

- Програмний додаток Fractan 4.4 для дослідження фрактальних властивостей часових рядів;

- Створений для дослідження програмний додаток на мові програмування Python: для інтеграції з API transparency platform ENTSO-E, збереження даних в базі даних, нормалізації даних.

У дослідженні проаналізовано часові ряди електричного навантаження енергосистем Бельгії та Польщі за період 2015–2025 рр., отримані з відкритої бази ENTSO-E. Для Бельгії були використані два набори даних з різною дискретністю: 15-хвилинною, яка повністю відображає вихідну структуру даних, та агреговані 60-хвилинні дані, сформовані шляхом усереднення 15-хвилинних значень. Дані для Польщі містили годинну дискретність (з 2024 року - зведені з 15-хвилинних вибірок). Обсяг вибірок становив відповідно 382043 відліків для Бельгії та 95510 відліків для Польщі. На цих рядах виконано обчислення показника Херста (H), фрактальної розмірності (D = 2 – H), кореляційної ентропії та мінімальної розмірності фазового простору для оцінки складності та динамічної структури сигналу навантаження.

Показник Херста для Бельгії з дискретністю 15 хвилин склав H = 0.8097 ± 0.2840, для годинної версії H = 0.8093 ± 0.2840, а для Польщі H = 0.7554 ± 0.1406. Значення H значно перевищують 0.5, що свідчить про наявність довготривалої пам’яті та персистентної поведінки, коли тенденції зміни навантаження зберігаються протягом тривалих часових періодів. Рівень персистентності, що наближається до 0.8-0.9, характерний для процесів, у яких кореляційні зв’язки повільно затухають і суттєво впливають на динаміку навіть на великих масштабах часу [6,7].

Фрактальна розмірність у всіх наборів даних також була стабільною: D = 1.1903 ± 0.2840 для Бельгії (15 хвилин), D = 1.1907 ± 0.2840 для Бельгії (60 хвилин) та D = 1.2446 ± 0.1406 для Польщі. На відміну від гауссівського білого шуму, для якого D = 1.5, значення близькі до 1.2 свідчать про самоорганізовану структуру змін навантаження, властиву фрактальним або масштабно-інваріантним процесам. Такі значення узгоджуються з Hurst-степеневим скалюванням.

Значення кореляційної ентропії становили 1.715 для Бельгії (15 хвилин), 0.765 для Бельгії (60 хвилин) та 0.668 для Польщі, що свідчить про непередбачуваність і хаотичні компоненти в структурі процесу. Мінімальна розмірність фазового простору оцінена як ≥ 7 для Бельгії та ≥ 6 для Польщі, що вказує на багатовимірну динаміку та неможливість опису навантаження простими одновимірними моделями (наприклад ARIMA та ін.).

Порівняння даних Бельгії з різною дискретністю показало, що ключові фрактальні характеристики залишаються інваріантними при переході від 15-хвилинної до годинної вибірки: зміна H становила лише - 0.05%, а зміна D - +0.03%. Збереження персистентності та стабільної фрактальної розмірності свідчить про масштабну інваріантність властивостей навантаження, що є визначальною ознакою фрактальних систем. Загалом отримані результати демонструють, що електричне навантаження в обох країнах є негауссівським, довгопам’ятним, має ефект самоорганізації зі складною багатовимірною структурою, яка зберігається на різних часових масштабах.

Наукова новизна На основі аналізу встановлено, що навантаження електричних мереж є фрактальним процесом із самоподібними властивостями, має довготривалу пам'ять (H ≈ 0.8), демонструє нелінійність та багатовимірність, а також відхилення від властивостей гауссівської природи та зберігає свої властивості при зміні дискретності. Отримані результати можуть бути використані для подальшого дослідження часових рядів даних про електричне навантаження і розробки методів оцінки і прогнозування адекватних досліджуваним процесам.

Висновки. На основі проведеного дослідження встановлено що навантаження електричних мереж Бельгії та Польщі за 2015–2025 рр. має фрактальні, персистентні та негауссівські властивості. Виявлено стабільну фрактальну розмірність D ≈ 1.19-1.24, що підтверджує наявність цих властивостей. Показник Херста стабільно перевищує 0.75, що обумовлює довготривалу пам'ять. Виявлені властивості вказують напрям подальших досліджень заснованих на методах нелінійної динаміки і детермінованого хаосу [8, 9].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. European Network of Transmission System Operators for Electricity. ENTSO-E Transparency Platform. URL: https://transparency.entsoe.eu (дата звернення: 25.11.2025).
2. European Network of Transmission System Operators for Electricity. Reference Documentation - Transparency Platform [електронне видання]. URL: https://transparencyplatform.zendesk.com/hc/en-us/articles/12784099471764-Reference-Documentation (дата звернення: 25.11.2025).
3. European Network of Transmission System Operators for Electricity. Manual of Procedures (MoP) [електронне видання]. URL: https://www.entsoe.eu/data/transparency-platform/mop (дата звернення: 25.11.2025).
4. European Network of Transmission System Operators for Electricity. EMFIP ECP Integration Guide v1.12. URL: https://www.entsoe.eu/Documents/MC%20documents/Transparency%20Platform/EMFIP_ECP_Integration_Guide_v1.12.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
5. Кіріченко Л. О., Радівілова Т. А. Фрактальний аналіз самоподібних і мультифрактальних часових рядів. Харків : Press of the Kharkiv National University of Radioelectronics, 2016. 160 с. DOI: 10.30837/978-617-77-22-82-2.
6. Берзлев О. Ю. Методика передпрогнозного фрактального аналізу часових рядів. *Зб. наук. пр. Ужгородського нац. ун-ту*. Ужгород : Ужгородський національний університет, 2015. С. 112-125.
7. Локтіонова О. С., Геляровська О. А. Застосування методу Херста у сучасній економіці. *Матеріали конференції молодих учених і спеціалістів* : тези доп. (Харків, 14--16 травня 2019). Харків : Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2019. С. 145--149.
8. Основи нелінійної динаміки. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. URL: http://csc.knu.ua/media/filer_public/6c/11/6c11b5e3-2d42-484c-9690-3ca5cace035f/osnovi_neliniinoyi_dinamiki.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
9. ГУСЄВ О., СІДАНЧЕНКО В. Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі //Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – 2022. – №. 2. – С. 24-31. https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-3

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9

H. Shvachych[1], V. Pashchenko[1], O. Dmytriyeva[2]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[2]Research center of simulation technologies (SimTech), University of Stuttgart

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE SYSTEM FOR GENERATING PROCEDURALLY GENERATED 2D MAPS

Abstract. This paper examines the development of an interactive software system for constructing two-dimensional maps based on the Wave Function Collapse (WFC) algorithm. The system enables automatic generation of coherent maps that take local constraints into account, providing flexible pattern configuration, interactive user interaction, and visualization of results. The development has practical significance for the gaming industry, educational platforms, and simulation environments. The paper describes the system architecture, the principles of the WFC algorithm, the implementation of the graphical interface, and the testing results.

Keywords*: interactive system, algorithm, two-dimensional maps, system architecture, WFC algorithm.*

Introduction. Automatic content generation is one of the key areas of modern software development, increasingly influencing the advancement of the gaming industry, computer graphics, modeling, and simulation systems. By enabling the creation of complex structures, maps, or objects without constant human intervention, such technologies significantly improve development efficiency and open new horizons for creativity.

Map generation, in particular, plays a crucial role in video games, educational simulators, and scientific visualizations. In these fields, automation allows for the rapid creation of large, diverse, and logically consistent environments, making user experiences more engaging and dynamic. For example, in video games, procedurally generated maps ensure unique gameplay sessions; in simulators, they provide realistic learning scenarios; and in scientific research, they enable the modeling of complex environments for analysis.

Traditional methods of creating maps and levels require significant resources, time, and manual work from artists and designers. This limits the scalability and variability of content. In response to these challenges, a number of procedural generation algorithms have been developed, among which the Wave Function Collapse (WFC) algorithm stands out.

The WFC algorithm offers an effective solution – it allows the generation of coherent maps and structures based on a given example while considering local

constraints and stochastic principles. This approach combines elements of probabilistic modeling and information theory, ensuring a balanced mix of predictability and randomness. As a result, the generated content both follows the logical structure of the source sample and exhibits unique variations, making it ideal for automated design.

Thus, the Wave Function Collapse algorithm becomes a powerful tool for developers who aim to create flexible, scalable, and intelligent content generation systems that combine mathematical rigor with the creative potential of artificial intelligence.

The purpose of this research is to develop an interactive system that allows the user to define generation parameters, observe the map construction process in real time, edit the result, and export it in a convenient format.

Analysis of the Wave Function Collapse Algorithm. The *Wave Function Collapse (WFC)* algorithm is one of the most well-known and efficient methods of procedural content generation in modern programming. Its essence lies in creating new structures (maps, images, levels, etc.) based on a given example, while maintaining local compatibility rules between elements. Although the algorithm's name is borrowed from quantum mechanics, WFC is not a physical model – it only uses an analogy to the process of "wave function collapse," where an indeterminate state gradually narrows down to a specific outcome [1].

The core idea of the algorithm is that each cell of the future map has a certain set of possible states (tiles) that can occupy that position. Initially, all cells have maximum entropy – meaning that each of them can be any tile. The algorithm then sequentially "collapses" individual cells, selecting one of the possible states according to probabilistic principles or predefined rules. After a state is chosen, the algorithm updates neighboring cells, narrowing their possible options in accordance with local constraints.

This process continues until all cells receive definite values, forming a complete and logically consistent map. If, at any point, a conflict arises (meaning there are no valid options for a given cell), the algorithm can apply backtracking – returning to previous states and regenerating with different choices.

Let us highlight the key advantages of the WFC algorithm:

– Consistency of results. The algorithm ensures that neighboring map elements are logically compatible – roads connect to roads, walls align with corners, and textures blend smoothly into one another. This provides naturalness and structural integrity in the generated environment.

– High variability. Due to the stochastic nature of the WFC algorithm, each new generation differs from the previous one, even when using the same sample. This creates an almost limitless number of unique content variations.

– Learning from examples. The algorithm does not require rigid manual rule programming – it is sufficient to provide a sample map or pattern, from which it independently derives the rules of tile placement. This approach resembles the basic principles of machine learning in its simplest form.

– Flexibility in constraint configuration. The developer can specify additional rules: which elements cannot be adjacent, which must be present, or which map regions must follow a certain structure. This makes it possible to create both fully automated and semi-controlled generation systems.

With the advancement of algorithms such as WFC, interactive approaches to content generation are becoming increasingly important. In such systems, the user does not simply receive a finished result but can actively influence the process of creating a map or level.

Let us outline the main principles of interactivity:

– Visual control over the process. The user can observe the generation process in real time – seeing how the algorithm gradually fills the map, which areas remain undefined, and how the structure changes after each collapse step.

– User intervention capability. If a particular section of the map does not meet expectations, the user can modify or lock specific tiles, make manual adjustments, or define additional constraints. This transforms the algorithm from a fully automated tool into a flexible creative instrument.

– Real-time feedback. Through interactive interfaces, the user can immediately see the results of their actions. This not only increases workflow efficiency but also promotes a deeper understanding of the algorithm's operating principles.

Architecture of the WFC-Based Map Generation System. The architecture of the system implementing the *Wave Function Collapse* (WFC) algorithm is designed in a modular way, ensuring scalability, ease of maintenance, and the ability to integrate with other software products. Each module performs its specific role, yet all of them interact through clearly defined interfaces. This approach allows developers to easily extend functionality, adapt the system to new requirements, or port it to other platforms [2].

Generation Module. This component serves as the core of the system – it implements the logic of the WFC algorithm and is responsible for constructing the map or spatial structure.

Main functions of the generation module:

– Pattern analysis (sample recognition): at the initial stage, the system identifies all unique tiles in the input pattern and determines their compatibility rules based on their spatial arrangement.

– Compatibility table construction: a matrix is generated that defines which tiles can be adjacent to one another in different directions (up, down, left, right).

– Stochastic state selection: for each map cell, a tile is selected from the set of allowed options, taking into account its probability (frequency in the pattern).

– Constraint propagation: after a tile is selected, the system updates the possible states of neighboring cells to avoid conflicts and maintain logical consistency.

– Backtracking: if the system reaches a state where no valid tile can be placed, the algorithm automatically returns to a previous step to attempt a different combination.

This module is implemented in *JavaScript*, which ensures efficient work with multidimensional data arrays, matrices, and related operations. Thanks to this, the generation of even large maps is performed quickly and without significant delays.

Graphical User Interface (GUI). The graphical interface is built using the ReactJS framework, providing flexibility and convenience in creating interactive tools. The main goal of the interface is to make the generation process intuitive and visually clear.

Key features of the graphical interface:

– Setting generation parameters: the user can select the input pattern, map size, level of randomness, type of constraints, and more.

Visualization of the Generation Process. The system visualizes the map formation in real time – from the initial state to the final result.

Manual Map Editing. The user can replace individual tiles, lock specific areas, or define new rules for local regions.

Interactive Feedback. Any change is immediately reflected on the screen, allowing the user to experiment with parameters and instantly observe the results in real time.

The interface design follows the principles of ergonomics and minimalism: the main screen is divided into a map preview area, a toolbar, and a parameters panel. This provides a clear workflow structure and lowers the entry barrier for new users.

Saving and Export Module. The generation results can be saved in various formats depending on the user's or system's needs.

Main export formats:

– PNG – convenient for visual representation or publication of the map.

– JSON – used to store the map's structure as a dataset of tile positions and properties, facilitating integration with other applications.

– CSV – suitable for analytical or statistical purposes where a simple tabular data format is required.

The export module supports automatic saving after generation completion as well as manual export via the graphical interface. In addition, version control is implemented, allowing users to save multiple iterations of a map for comparison or further analysis.

Architectural Features.

– Scalability: new functions can be added without modifying the core structure of the program.

– Ease of testing: each module can be tested independently, which increases the system's reliability.

– Interactivity: the user has full control over the generation process.

It is worth noting that the architecture of the system based on the Wave Function Collapse algorithm combines intelligent content generation methods, a flexible interface, and powerful integration capabilities. By utilizing JavaScript, the React and Lodash libraries, as well as a custom implementation of the WFC algorithm, the system achieves high performance, intuitive user interaction, and extensive potential for future expansion.

Practical Significance of the Research. The development and implementation of a content generation system based on the Wave Function Collapse (WFC) algorithm has substantial practical potential across multiple fields – from the entertainment industry to education, science, and geographic information systems. The algorithm enables the automation of complex, structurally consistent environments that previously required extensive manual work from designers, developers, or analysts. Below are the main areas where the results of this research have the greatest applied value [3].

Gaming Industry. One of the most evident applications of WFC is in generating game levels, landscapes, mazes, and maps. Modern video games often require vast amounts of content – unique locations, dungeons, buildings, or entire worlds. Manually creating such content demands considerable resources, especially for open-world projects or those with a high level of detail.

The Wave Function Collapse algorithm allows developers to:

– create procedurally generated levels that preserve the design logic defined by an artist's example;

– ensure high variability – each gameplay session can feature a different map configuration;

– integrate the system into engines such as Unity, Unreal Engine, or Godot via API;

– maintain a balance between randomness and structural consistency, making the gameplay both predictable and engaging.

Thus, the WFC algorithm provides developers with the ability to build games featuring virtually limitless variations and high replayability, while significantly reducing the cost of manual content creation [4].

Education. In the field of education and training simulations, the WFC algorithm can be used to automatically generate educational maps, virtual environments, training modules, and interactive scenarios.

By doing so, WFC bridges learning, modeling, and creativity, creating interactive and adaptable educational tools that enhance engagement and understanding.

Scientific Visualization. In scientific contexts, the Wave Function Collapse algorithm can be applied to model complex natural and artificial systems, where local dependencies and patterns play a crucial role [5].

Scientific vizualizations generated using WFC have two main advantages:

– First, they allow for the rapid creation of consistent models that adhere to predefined interaction rules.

– Second, due to their stochastic nature, researchers can generate multiple alternative scenarios and analyze their statistical behavior.

Such tools are particularly valuable in mathematical modeling, bioinformatics, physical simulations, and environmental research [6].

In conclusion, the practical significance of this study lies in the development of a universal system that combines intelligent content generation, flexible customization, and a high degree of adaptability. Thanks to the Wave Function Collapse algorithm, users

across various domains – from game designers to scientists – gain a tool capable of automatically creating logically consistent, realistic, and functional environments [7].

Conclusions. In the course of this research, an interactive software system for automated two-dimensional map generation based on the Wave Function Collapse (WFC) algorithm was developed and implemented. The system combines an intelligent approach to spatial structure construction with the capability for user interactivity, making it an effective tool for both practical and educational purposes.

The developed system demonstrates high efficiency in generating coherent maps while offering a wide range of flexible configuration options. This allows users to control the environment creation process, adjust the level of stochasticity, define constraints, or use custom templates to train the algorithm. As a result, users can obtain unique maps with desired characteristics – from simple mazes to complex structures featuring diverse elements.

Thus, the developed interactive system confirms that the Wave Function Collapse algorithm is a powerful tool for automatic structured content generation. It combines mathematical precision, practical usability, and creative potential, providing a flexible environment for experimentation, learning, and creativity.

The results obtained confirm the successful achievement of the research objectives and demonstrate the practical significance of the study. The system can be effectively applied in scientific and educational projects, as well as in practical domains – particularly in game development, simulations, geoinformation technologies, and architectural modeling.

REFERENCES

1. Cheng D., Han H., Fei G. Automatic Generation of Game Levels Based on Controllable Wave Function Collapse Algorithm [Електронний ресурс] : Proc. of ICEC 2020, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12523 / D. Cheng, H. Han, G. Fei. – Switzerland : Springer Nature, 2020. – P. 37-50. DOI:10.1007/978-3-030-65736-9_3.
2. Kim H., Lee S., Lee H., Hahn T., Kang S. Automatic Generation of Game Content using a Graph-based Wave Function Collapse Algorithm [Електронний ресурс] : Proc. 2019 IEEE CoG / H. Kim, S. Lee, H. Lee, T. Hahn, S. Kang. – New York : IEEE, 2019. – DOI:10.1109/CIG.2019.8848019.
3. Nie Y., Zheng S., Zhuang Z., Song X. Extend Wave Function Collapse to Large-Scale Content Generation [Електронний ресурс] : arXiv preprint, 14 серпня 2023. – 2023.8.14. – 8 с.
4. Heese R. Quantum Wave Function Collapse for Procedural Content Generation [Електронний ресурс] : arXiv preprint, 21 грудня 2023. – 2023.12.21. – (quant-ph).
5. Yıldız D., Demirci S. Enhancing Wave Function Collapse Algorithm for Procedural Map Generation Problem [Електронний ресурс] : NÖHÜ J. Eng. Sci., 2024; 13(3):806-814.
6. Sandhu A., Chen Z., McCoy J. Enhancing Wave Function Collapse with Design-Level Constraints [Електронний ресурс] : Proc. SIGGRAPH Posters ’22, 2022. – ACM, 2 с.
7. Sandhu A. TileTerror: A System for Procedurally Generating 2D Tilemaps for Horror Games [Електронний ресурс] : ExAg Workshop, 2021. – A. Sandhu. – 2021. – PDF.

УДК 004:02

B. I. Moroz[1], O.O. Shyshatskyi[1], O. Sirotkina[2]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[2]School of Computer Science University of Windsor, Windsor, Ontario, Kanada.

METHODS, ALGORITHMS, AND PROGRAMS FOR ERROR DETECTION IN A GEOSPATIAL DATABASE

Annotation. The problem of ensuring data quality in geospatial databases is examined. Improving data reliability is achieved through an integrated control system that combines spatial analysis, algorithmic validation, and artificial intelligence methods.

Keywords*: database, spatial, anomaly detection, outlier, geospatial data, machine learning, data analysis, big data.*

Introduction. Modern geographic information systems (GIS) store large volumes of spatial data actively used in urban planning, environmental monitoring, land management. The data is a foundation for management and legal decision-making. The quality of such data has crucial importance, as errors in geometry, attribute values, or topological inconsistencies may distort analytical results, violate legislation, and lead to economic losses.

The widespread adoption of geospatial databases in various industries has led to an increase in data volumes and complexity of data generation mechanisms. Anomalies in such databases may appear as deviations from expected patterns or as logical and spatial inconsistencies. They occur during data collection, processing, integration, or updating and may be a result of human error, technical failures, or inaccuracies inherited from source documents.

Existing studies confirm that errors in geospatial data can significantly affect analytical accuracy and slow down the use of information in practice[1]. As data volumes grow, manual verification becomes inefficient, creating a need for automated quality control methods and anomaly detection algorithms. However, there is still no comprehensive solution capable of performing a full cycle of error detection and correction across all anomaly types in geospatial data. This emphasizes the relevance of developing new methods and tools for automatic data analysis to ensure the reliability and accuracy of information systems.

Problem statement. Maintaining geospatial data quality is a critical task since any errors can impact legal decisions, spatial planning, land monitoring, and economic operations. Errors may arise due to human factors, technical deficiencies, inaccuracies in primary documents, or discrepancies among data sources.

To address the issue, the following tasks must be solved:

1. Conduct an analysis of scientific literature regarding known error types in geospatial data and identify their causes.
2. Develop a classification of common errors in geospatial databases.

3. Study existing methods and algorithms for automated error and anomaly detection in spatial data.
4. Design original methods and algorithms for automated identification and prevention of different error types.
5. Develop a software module for geospatial data analysis and implementation of the proposed algorithms.
6. Test the developed algorithms on real-world data and evaluate their effectiveness.

Main content. At the initial stage, a thorough analysis of existing scientific and technical sources was carried out, allowing systematization and preliminary identification of known error classes in geospatial databases. This provided a foundation for further empirical testing.

Within the study, a dataset from the State Land Cadastre of Ukraine was analyzed, based on data published through the API services in 2021-2022. The analyzed dataset contained over 24 million records, ensuring statistical significance of the results.

Based on this dataset, four key groups of inconsistencies were identified [2]:

1. Attribute errors: inaccurate or missing data, incorrect field values.
2. Geometric errors: positional inaccuracies, incorrect object shape or size representation.
3. Topological errors: violations of spatial relationships (e.g., boundary overlaps, gaps, missing connections, duplicate objects).
4. Contextual errors: logical inconsistencies between data and external sources or regulatory requirements.

Practical testing of the developed algorithms on real datasets confirmed the capability of automated procedures to detect inconsistencies at early processing stages and prevent deterioration of spatial data quality [3].

A key achievement of the second stage was the systematization of detected issues. An extended hierarchical error classification was developed, encompassing the four main violation groups and providing a new level of detail [4].

At the current stage, the focus has shifted toward automation of data entry and subsequent validation. Special attention is paid to working with unstructured data sources (including paper documents), since a significant portion of historical geospatial information is preserved in scanned archives and textual materials. The study plans to apply computer vision and natural language processing (NLP) technologies for automatic data recognition, document structuring, and consistency verification with registry data.

Future research also involves the development of AI-driven modules for data validation, detection of non-local interdependencies, and statistical detection of complex anomalies, as outlined in previous works.

The scientific novelty of the research lies in the formation of a comprehensive geospatial data quality assurance concept that covers all stages of the data life cycle – from initial creation and input from heterogeneous sources to long-term maintenance,

updating, and analytical use. The proposed approach integrates classical spatial analysis methods, algorithmic consistency validation procedures, and modern artificial intelligence technologies. This enables a complete quality control cycle – from processing unstructured information to intelligent anomaly monitoring in large-scale geospatial systems.

The scientific novelty of the research lies in the formation of a comprehensive geospatial data quality assurance concept that covers all stages of the data life cycle – from initial creation and input from heterogeneous sources to long-term maintenance, updating, and analytical use. The proposed approach integrates classical spatial analysis methods, algorithmic consistency validation procedures, and modern artificial intelligence technologies. This enables a complete quality control cycle – from processing unstructured information to intelligent anomaly monitoring in large-scale geospatial systems.

Conclusions. This study addresses the issue of data quality assurance in large-scale information systems and justifies the need for a comprehensive approach that covers all stages of the data life cycle – from initial formation and input to long-term maintenance, updating, and analytical utilization. Based on the conducted research:

- Existing practices for ensuring geospatial data reliability were analyzed, and their limitations were identified under growing data volume and source diversity conditions.
- A classification of typical errors and anomalies in spatial databases was developed, and their main sources were determined.

The current stage of research focuses on developing tools for automated data processing and validation using AI models capable of extracting information from unstructured textual documents, performing semantic attribute validation, and detecting complex anomalies. Future work will be dedicated to creating an integrated system combining classical GIS procedures with intelligent algorithms capable of providing scalable, reliable, and efficient geospatial data quality assurance.

The research results will form a methodological basis for building modern systems of geospatial data quality control – a key component for the functioning of state registries, municipal planning systems, infrastructure, and environmental platforms. Their implementation will help minimize human error, increase analytical accuracy, and support informed decision-making in spatial development management.

REFERENCES

1. Chrisman, N. R. The error component in spatial data. Geographical information systems. 1991. T. 1, № 12. C. 165–174.
2. Ndehedehe, C. Understanding Errors and their Measurement in Geoinformation. Journal of Environmental Sciences and Resources Management. 2013.
3. Moroz, B., Shyshatsky, O. O. Methods, algorithms, and programs for error detection in a geospatial database: a case study of the state land cadastre. System technologies. 2025. T. 2, № 157. C. 82.

4. Moroz, B.I, Shyshatsky, O. O. Classification of errors in geospatial databases based on the example data of the state land cadastre. Computer-integrated technologies education science production. 2025. № 58. С. 92.

УДК 004.8

С.Ю. Семенов[1], І.С. Лактіонов[1], Г.Г. Дяченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ВЕБЗАСТОСУНКУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ АГРОКУЛЬТУР ІЗ ІНТЕГРАЦІЄЮ АЛГОРИТМІВ ПОЯСНЮВАЛЬНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Представлено результати розробки вебзастосунку на основі фреймворку Flask для прогнозування врожайності агрокультур із вбудованим програмним модулем на базі алгоритмів пояснювального штучного інтелекту та інтерактивним інтерфейсом. Система поєднує алгоритми машинного навчання, засоби візуалізації та API-інтеграцію для підтримки прийняття агротехнічних рішень.

***Ключові слова**: прогнозування, врожайність, Flask, машинне навчання, пояснювальний штучний інтелект, Plotly, SQLAlchemy, API, агромоніторинг.*

Вступ. Підвищення ефективності управління агровиробництвами в Україні потребує розробки та впровадження інтелектуальних систем і технологій, здатних перетворювати кліматичні та технологічні дані на достовірні прогнози врожайності. Проте більшість існуючих рішень залишаються «чорними скриньками» для користувачів, що ускладнює довіру до прогнозів. Отже, актуальною задачею є розробка програмно-алгоритмічних рішень інформаційних систем прогнозування агротехнічного призначення з вбудованими засобами інтерпретації машинних рішень, орієнтованих на кінцевого користувача. В цьому контексті виборча реалізація алгоритмів машинного навчання та пояснювального штучного інтелекту (ШІ) у формі вебплатформ стає одним із найважливіших напрямів. Ці технології здатні не лише аналізувати дані, але й забезпечувати необхідну прозорість в підтримці прийняття рішень завдяки інтеграції пояснювальних механізмів, що особливо актуально в умовах нестабільного клімату та потреби в адаптації агровиробництва до змінних умов навколишнього середовища [1–3]. Аналіз відомих досліджень показує, що методи машинного навчання демонструють високу точність під час прогнозування врожайності сільськогосподарських культур. Наприклад, моделі, побудовані на основі цих технологій, довели свою ефективність у прогнозуванні врожайності пшениці, враховуючи різні фактори й параметри, включаючи екологічні умови та фази вегетації рослин [4]. Це підкреслює важливість використання даних про навколишнє середовище для

підвищення точності прогнозів, що може мати критично важливе значення в умовах зміни клімату [5].

Метою досліджень є підвищення ефективності агротехнологічних процесів вирощування сільськогосподарських культур у польових умовах шляхом створення інтегрованого Flask-застосунку, який здійснює прогнозування врожайності агрокультур на основі даних комп'ютеризованого моніторингу та надає користувачу інтерпретацію результатів засобами пояснювального ШІ (XAI), інтерактивної візуалізації та API-доступу до даних.

Основний зміст роботи. Розроблено архітектуру Flask-застосунку з однорівневою серверною логікою типу «monolithic web application». Система в своїй архітектурі поєднує модулі вебінтерфейсу, бази даних, моделі на основі алгоритмів машинного навчання та підсистему XAI. Вона функціонує за принципом «edge ML as a service». Локальний сервер було розгорнуто на базі Raspberry Pi 4, який опрацьовує запити користувача, виконує застосування навченої моделі на нових даних та повертає прогноз із поясненням.

Логіка роботи системи реалізована через набір функціональних сценаріїв взаємодії користувача із сервером, як показано на рисунку 1, що охоплюють: реєстрацію та автентифікацію користувача; формування запиту на прогноз і отримання пояснення; перегляд трендів та візуалізацію даних; пакетне додавання записів через захищений API. Введені дані валідуються у формі Flask-WTF, масштабуються за StandardScaler та передаються на вхід ML-моделі, яка побудована на основі алгоритму Random Forest. Результат обчислення та HTML-пояснення генеруються програмним модулем на основі ELI5 і надсилаються користувачу засобами електронної пошти через SMTP-сервіс.

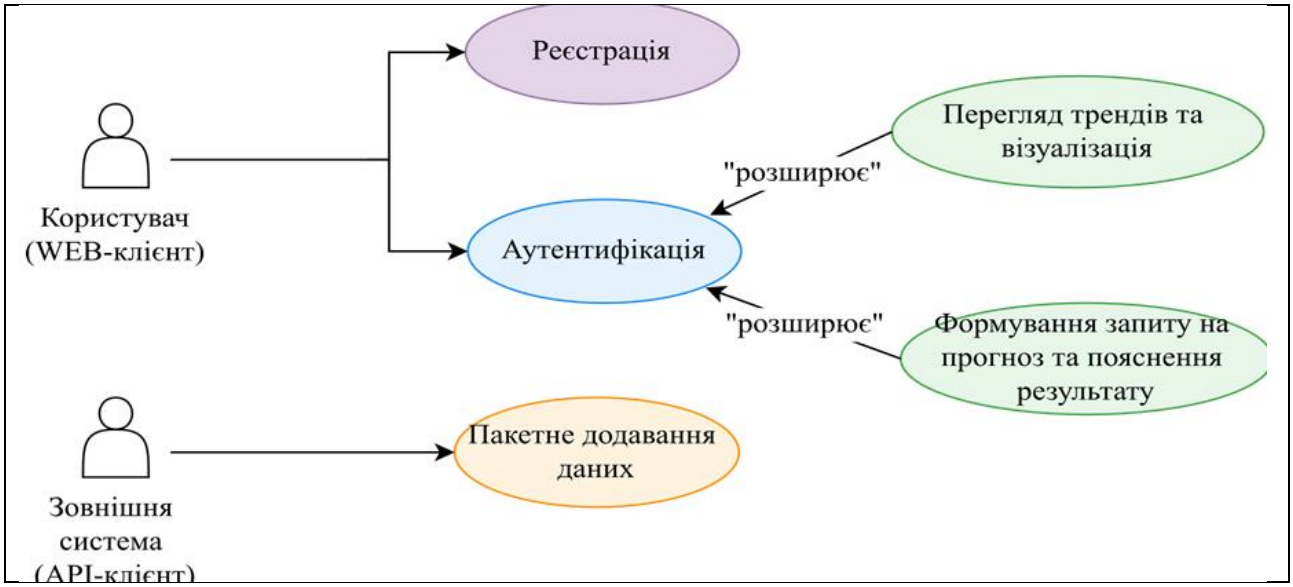


Рис. 1. Графічна інтерпретація функціональних сценаріїв розроблюваної системи

У результаті отримання POST-запиту /predictions, як показано на рисунку 2, система послідовно виконує такі дії: валідація даних – попередня обробка – застосування навченої моделі – генерування пояснення – візуалізація результатів – повідомлення користувача. Під час такої реалізації було синтезовано наскрізний конвеєр обробки даних із забезпеченням прозорості та відтворюваності розрахунків.

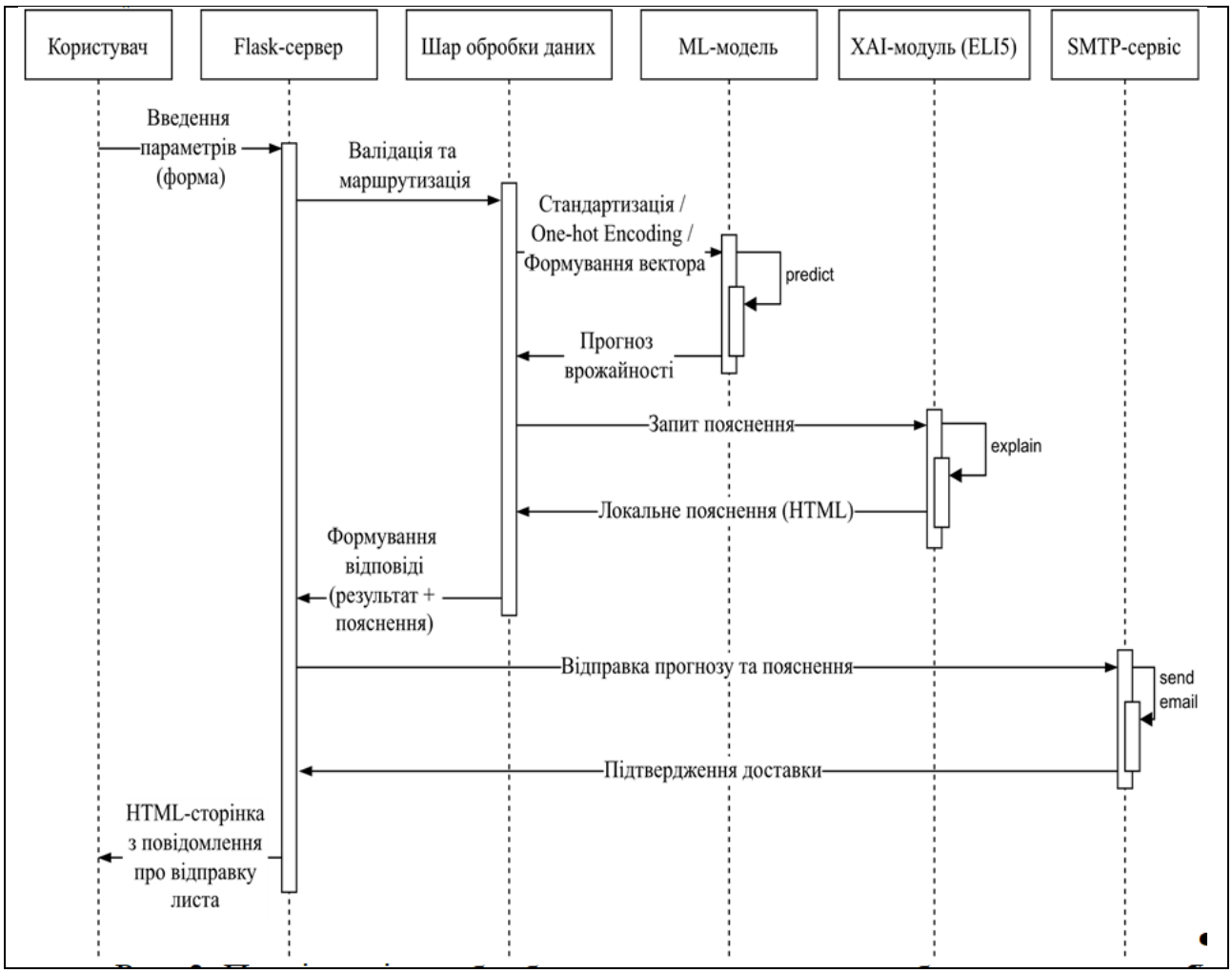


Рис. 2. Послідовність обробки запиту в межах розроблюваної системи

Вебінтерфейс створено на основі шаблонізатора Jinja2 та фреймворка Bootstrap. Такий підхід забезпечує адаптивне відображення форм і графіків. Сторінки /home, /predictions та /trends реалізують механізми автентифікації, введення даних та аналізу історичних результатів агрокліматичних спостережень. Графічна інтерпретація результатів обрахунків виконана засобами Plotly у вигляді інтерактивних HTML-графіків, які інтегровано в шаблони через Jinja. Вбудований програмний модуль на основі пояснювального ШІ (ELI5) забезпечує кількісну оцінку внеску кожної ознаки до результату прогнозування, що підвищує довіру та інтерпретованість результатів.

Під час досліджень також реалізовано RESTful API-ендпоінт для масового додавання структурованих записів через JSON-запити із авторизацією за API-ключем. Формат даних сумісний із Flask-SQLAlchemy. Такий підхід спрощує інтеграцію із зовнішніми джерелами та автоматизацію завантаження статистичних агропоказників.

На кінцевому етапі досліджень було визначено ризики, що пов'язані з автентифікацією, SMTP-комунікацією та ресурсними обмеженнями мікрокомп'ютерної платформи Raspberry Pi 4. Рекомендовано застосування SSL/TLS, JWT-токенів, контейнеризації (Docker), а також поступовий перехід до мікросервісної архітектури з онлайн-навчанням моделей на локальних агрокліматичних даних і глобальними метаінтерпретаторами XAI.

Наукова новизна результатів досліджень полягає в удосконаленні підходів та програмно-алгоритмічного забезпечення обробки інформаційних потоків під час прогнозування врожайності агрокультур шляхом розробки та впровадження модуля локальних пояснень ELI5 в інтегровану архітектуру Flask-застосунку, яка поєднує застосування програмно реалізованих ML-моделей із підтримкою API та інтерактивної візуалізації у єдиному інформаційному конвеєрі.

Висновки. Розроблений Flask-застосунок забезпечує повний цикл обробки даних агромоніторингу від введення до інтелектуальної аналітики й інтерпретації результатів та є основою для побудови систем підтримки прийняття рішень у сільському господарстві. Перспективи розвитку полягають у масштабуванні та впровадженні глобальних моделей XAI і методів онлайн-навчання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Jahana K. Integrating AI and Machine Learning into Agricultural Meteorology for Sustainable and Climate-Smart Farming. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2025, Vol. 47 (9). P. 300–311. https://doi.org/10.9734/jeai/2025/v47i93750.
2. Dhakshayani J., Surendiran B., Jyothsna J. Artificial intelligence in precision agriculture: a systematic review on tools, techniques, and applications. Predictive analytics in smart agriculture. 2024, 312 p. https://doi.org/10.1201/9781003391302.
3. Laktionov I., Diachenko G., Kashtan V., Vizniuk A., Gorev V., Khabarlak K., Shedlovska Y. A comprehensive review of recent approaches and hardware–software technologies for digitalisation and intellectualisation of open-field crop production: Ukrainian case study in the global context. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024, Vol. 225. P. 1–31. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109326.
4. Ed-daoudi R., Haloui M.E. Interpretable machine learning for multi-crop yield prediction in semi-arid regions: a hierarchical approach to handle climate data sparsity. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*. 2025, Vol. 13 (3). P. 1217–1228. https://doi.org/10.22194/jgias/25.1694.
5. Aaryan N., Sharma V., Yadav L. Leveraging ai for climate action: enhancing predictive models for extreme weather events. *International Journal on Science and Technology*. 2025, Vol. 16 (2). P. 1–10. https://doi.org/10.71097/ijsat.v16.i2.3934.

УДК 004.942

H. Shvachych[1], G. Shykhaliiev[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE DEVELOPMENT AND CREATION OF RESPONSIVE EMOTIONALLY ORIENTED MOBILE APPLICATION

Annotation. In the research, a creation process of a responsive, emotionally oriented mobile app is presented, which is capable of identifying an emotional state of a user in real time, particularly in the moment of crisis (war conflicts, evacuation, post-traumatic stress, etc). The developed prototype integrates technologies of intellectual personal analysis for the realization of personal recommendations of video content, to lower the level of anxiety, to increase motivation, and to provide informational and psychological support. The system connects mechanisms of emotional analysis, responsive interface, and content therapy, which contributes to the improvement of the psycho-emotional state of a user and increases the efficiency of their digital interactions.

Keywords: *mobile application, emotional state, video content, informational support, interface.*

Introduction. A modern phase of development of informational technologies is characterised by the high level of integration of mobile applications in the daily life of a user. Not only do they perform functional but also psycho-emotional tasks, affecting the psychological state of a person. The increasing demand for personalized digital decisions necessitates the development of intelligent applications that can adapt to a user's emotional context.

The relevance of the research is defined by the demand for creating emotionally sensitive systems, which take the psychological state of a person into account, especially in the moment of crisis. Such systems can significantly increase the efficiency of digital interaction and provide users with psychological support in real time.

Adaptability of mobile applications suggests dynamic change of the interface, algorithms of interaction, and information content according to the emotional state of a user. It opens new prospects in the development of cognitive computer science, emotional artificial intelligence, and UX design. Implementation of these technologies is especially important in such fields as education, mental health care, social media, and crisis support services.

This research aims to develop a concept, architecture, and prototype of an adaptive, emotionally oriented mobile application that can identify a user's emotional state and dynamically adapt the interface, functionality, and video content recommendations, particularly during moments of psychological or social crisis. Particular attention is given to the implementation of intelligent mechanisms for personalized recommendations that promote emotional stabilization, support, and enhancement of a user experience through relevant multimedia content.

The main content of the research. The application operates in real time to determine the emotional state of a user who is in the moment of crisis (such as a military conflict, evacuation, a humanitarian disaster, post-traumatic stress, etc.), and based on this state, recommends a video content that:

– reduces the level of anxiety, stress, or emotional exhaustion,

– enhances motivation and provides informational or psychological support,

– helps a user navigate the current crisis.

Regarding the functionality of the emotion-oriented mobile application in crisis conditions, the following aspects should be noted. The mobile application is designed to address the following issues:

Real-time detection of a user's emotional state.

The application uses a combination of sensor data, behavioral patterns, and machine learning to analyze a user's emotional condition. This may include:

– facial expression analysis via the front camera (with a user's consent);

– stress detection through speech tempo, tone, or pauses;

– assessment of activity levels (movement, geolocation, frequency of device interactions);

– processing of user text messages or queries;

– consideration of context: geographical location, news background, type of emergency.

Video content recommendations to reduce anxiety, stress, or emotional exhaustion. Based on the identified emotional state, the application recommends videos that:

– have a calming visual and audio atmosphere (scenes of nature, meditation, ASMR);

– include breathing exercises, relaxation techniques, and short meditation sessions;

– offer gentle humor, uplifting stories, and non-triggering content.

This approach promotes emotional stabilization, reduces cortisol levels, and improves overall well-being.

Enhancing motivation and psychological support. In cases where a user shows signs of apathy, loss of motivation, or depression, the application may recommend:

– motivational speeches or stories of overcoming difficulties;

– videos with self-help and psychological hygiene advice;

– content that activates internal resources: music, sports, creativity.

Such recommendations aim to support a user's inner strength and foster positive thinking.

Orientation in the current crisis. In emergency conditions (military conflict, evacuation, humanitarian catastrophe), the application serves as an informational navigator:

– provides video instructions on safety, evacuation, and first aid;

– delivers localized updates on the situation (from official sources);

– explains how to act in cases of panic, isolation, or loss of communication.

This enables a user to maintain orientation, act rationally, and reduce risks.

The practical significance and social impact of implementation are as follows.

Instant emotional support for people in crisis.

In crises (such as shelling, evacuation, or loss of communication), people often have no access to a psychologist or even a simple way to calm down. An application that recognizes a user's emotional state and offers a short video with relaxation, breathing techniques, or a kind piece of advice can reduce panic, anxiety, or hopelessness.

For example, if a user speaks with a trembling voice or appears agitated, the system can suggest a video with soothing music, breathing control tips, or a short message from a psychologist to help stabilize the condition. As a result, a person receives instant psychological "remote support," which can significantly reduce the risk of panic attacks or emotional breakdowns. Thus, the application ensures quick access to video materials that help lower levels of panic or anxiety — a factor that can be critically important for emotional stabilization in crisis conditions.

Optimization of relevant content search. A user does not need to spend time searching for suitable videos — the system automatically selects safe and helpful content, minimizing information overload. This saves time, energy, and attention, which are severely limited under stress. A user avoids endless scrolling and accidental exposure to unwanted or shocking videos (which could increase anxiety). Therefore, the system helps prevent information overload and filters out potentially harmful content.

Support for aid services (aggregation of anonymous emotional state trends).

Based on anonymized data about users' emotional states in specific regions, it is possible to create heat maps of emotional tension. These can be valuable for:

– psychological support services,

– volunteer organizations,

– crisis response centers.

For example, if the number of users with high anxiety or depressive moods suddenly rises in a particular area, services can respond more quickly — by sending additional psychologists, organizing online support, or engaging local volunteer networks.

All data remain anonymous and are used only in an aggregated form for monitoring the population's emotional state.

Integration with local resources (hotlines, support services).

If a critical emotional state is detected (e.g., signs of a panic attack, high anxiety, disorientation, or depressive indicators), the application can recommend contacting a hotline or display a quick-access button to:

– the national psychological support service;

– volunteer assistance;

– emergency response services.

Integration with regional or local databases of resources is also possible, including:

– lists of safe shelters,
– contacts of mobile psychological support teams,
– up-to-date emergency instructions.

This creates a unified crisis support ecosystem in which a user receives not only emotional assistance but also practical guidance — who to contact, where to find safety, and how to act next.

Conclusion. Within the framework of the study, the relevance of developing an adaptive, emotion-oriented mobile application capable of responding to a user's emotional state—particularly under crisis conditions such as military conflict, evacuation, humanitarian disasters, or post-traumatic stress—has been substantiated. Considering the growing role of digital technologies in supporting psycho-emotional well-being, the proposed solution integrates artificial intelligence tools, emotional analysis, and adaptive UX design to create an intelligent environment that not only informs but also supports a user.

The application is designed to:

– determine a user's emotional state in real time through multimodal analysis (speech, facial expressions, behavioral patterns, context);

– adapt the interface and functionality according to the identified emotional needs;

– recommend video content that reduces anxiety, enhances motivation, or helps navigate the current crisis.

The development of such an application opens new perspectives in the field of human-centered technologies, where digital solutions become not only tools but also partners in overcoming psychological challenges. Integrating emotional sensitivity into mobile platforms enables a deeper, more personalized, and safer interaction between humans and technology.

Thus, the results of the research confirm the feasibility and effectiveness of implementing emotion-oriented mechanisms in mobile applications—especially in crisis contexts, where a rapid, adaptive, and supportive system response can play a decisive role in maintaining a user's psycho-emotional stability.

REFERENCES

1. Cherry K. What Are Emotions? Definition and Theories [Електронний ресурс] // *Verywell Mind*. – 2025. – Режим доступу: https://www.verywellmind.com/what-are-emotions-2795178.
2. Ekman P. Basic Emotions [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу: https://www.paulekman.com/wp-content/uploads/2013/07/Basic-Emotions.pdf.
3. Russell J. A. A Circumplex Model of Affect [Електронний ресурс] // *Journal of Personality and Social Psychology*. – 1980. – Vol. 39 (6). – P. 1161–1178. – Режим доступу: https://pdodds.w3.uvm.edu/research/papers/others/1980/russell1980a.pdf.
4. Plutchik R. Emotion: A Psychoevolutionary Synthesis. – Нью-Йорк: Harper & Row, 1980. – 345 с.
5. Singh R. Cinematherapy: A tool for self-understanding and healing [Електронний ресурс] // *All Multidisciplinary Journal*. – 2024. – Vol. 10 (9). – Режим доступу: https://www.allmultidisciplinaryjournal.com/uploads/archives/20240904203457_E-24-16.1.pdf.

УДК 004.85:004.931

І.М. Удовик[1], Л.І. Мещеряков[1], А.Т. Харь[1], Є.С. Байдашний[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОДЕЛІ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВІДЕОПОТОЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЗМУ УВАГИ

Анотація. Було обґрунтовано архітектуру моделі стеження за об'єктами у відеоряді. Були розглянуті аналітична і програмна складові запропонованої технології. Визначено основні принципи реалізації запропонованої моделі стеження за об'єктами у відеоряді: використання у якості основи моделі BOTT, визначення множини параметрів, що використовуються для визначення обмежувальних рамок цільового об'єкта у кожному кадрі відеоряду, та приведення завдання визначення схожості об'єктів між кадрами до бінарної класифікації, що значно зменшує обчислювальні витрати моделі.

***Ключові слова**: відстежування об'єктів, відео, нейронна мережа, трансформер, механізм уваги, CNN, MDNet, BOTT.*

Вступ. В останні роки такі галузі, як аналіз зображень і аналіз відео, розширили коло потенційних застосувань. Дві фундаментальні технології, які домінують у цій сфері, – це комп'ютерний зір та штучний інтелект. Візуальне відстеження об'єктів є ключовим завданням комп'ютерного зору з широким спектром застосування в різних сферах, включаючи відеоспостереження, інтелектуальне транспортування та взаємодію людини з комп'ютером. Метою візуального відстеження об'єктів є точне та послідовне відстеження конкретних цілей у відеоряді. Однак цьому процесу заважають такі фактори, як деформація, оклюзія, швидкий рух і фонові перешкоди.

Виявлення та відстеження об'єктів у режимі реального часу є великою, перспективною та складною областю комп'ютерного зору. Активне використання технології відстеження об'єктів сприяє розробці більш ефективних та конкурентоспроможних алгоритмів. Однак при реалізації відстеження об'єктів у реальному часі досі виникають проблеми, такі, як відстеження в динамічному середовищі, дорогі обчислення для забезпечення продуктивності в реальному часі або відстеження кількох об'єктів за допомогою кількох камер. Тому розробка та вдосконалення технологій стеження за об'єктами в відеоряді залишається актуальним напрямом досліджень.

Постановка задачі. Мета дослідження полягає у обґрунтуванні архітектури моделі, що забезпечує стеження за об'єктами у відеоряді із оптимальною точністю та швидкодією. Відповідно до поставленої мети було вирішено наступні завдання:

- дослідити принципи, технології та алгоритми стеження за об'єктами в відеоряді;
- обґрунтувати архітектуру моделі стеження за об'єктами в відеоряді;

- протестувати програмне забезпечення інформаційної технології стеження за об’єктами в відеоряді на базі обраної моделі.

Основний зміст роботи. Відстеження об’єктів у відеоряді має ряд обмежень, які формують вимоги до технології відстеження, для досягнення оптимальної точності та швидкодії. Цими вимогами є надійність, адаптивність та робота в режимі реального часу. Надійність означає, що система стеження може відстежувати ціль навіть у складних умовах, таких як перешкоди на фоні, оклюзія та зміна освітлення. Окрім змін навколишнього середовища, мішенню є зміни, такі як складний і раптовий рух цілі. Щоб вирішити цю проблему, система стеження повинна мати можливість виявляти та відстежувати поточні видимі характеристики цілі. Система, яка працює з послідовністю зображень, повинна мати високу швидкість обробки. Отже, існує потреба в реалізації високопродуктивної інформаційної технології стеження за об’єктами у відеоряді.

Існують різні підходи для відстежування об’єктів у відеоряді на основі глибокого навчання. Найпростіше такий функціонал можна реалізувати за допомогою рекурентних мереж різного типу, як з наявністю «пам’яті», так і без неї, а також з можливим додаванням в архітектуру шарів машинної уваги, і за допомогою згорткових нейронних мереж. Крім того, широке застосування знайшли архітектури на основі трансформерів, які демонструють високу ефективність у задачах виявлення та відстеження об’єктів.

Основні архітектури для розв’язання задачі стеження за об’єктами у відеоряді – це MDNet, DeepSORT, та BOTT.

MDNet (Multi-Domain Network) – це модель, яка заснована на сіамській нейронній мережі. Сіамська нейронна мережа – є нейронна мережа, створена з метою вивчення метрик відмінності між двома різними наборами вхідних даних. Для цього вона складається з двох однакових нейронних підмереж. Обидві ці мережі мають однакові ваги та параметри.

DeepSORT (Deep Simple Online and Realtime Tracking) – модель, основною особливістю роботи якої є фільтр Калмана. Фільтр Калмана – являє математичний алгоритм, який використовується для відстеження об'єктів у відеоряді. Він передбачає майбутнє розташування об'єкта, на основі попередніх кадрів.

BOTT (Box Only Transformer Tracker) – модель, заснована на архітектурі трансформерів і механізмі уваги. Трансформер – це підхід для обробки вхідних даних у вигляді послідовності з приділенням уваги розташуванню об'єкта в послідовності. Завдяки легшій архітектурі, яка на базовому рівні підтримує розпаралелювання, трансформер виконує все, що роблять рекурентні мережі, тільки швидше та якісніше.

Щоб визначити оптимальну архітектуру для стеження за об’єктами у відеоряді в режимі реального часу, необхідно експериментально оцінити та порівняти актуальні моделі із числа запропонованих вище трекерів на одній

обчислювальній платформі, та знайти найкращий варіант за співвідношенням точності та продуктивності.

Для порівняння було обрано моделі MDNet і BOTT. Обидві ці моделі відстежують один об'єкт у відеоряді. На відміну від них, DeepSORT створений для відстеження більшої кількості об'єктів одночасно. Однак, він не може бути використаний для онлайн відстеження об'єктів (відстеження в реальному часі), на відміну від двох інших моделей. Через це його порівняння з іншими двома моделями неактуальне в контексті даного дослідження. Далі буде розглянуто реалізацію моделей MDNet та BOTT.

Модель MDNet

Архітектуру MDNet можна розбити на 2 частини. Її схему наведено на рис.1.

Перша частина складається з комбінації згорткових і повністю пов'язаних шарів. Ця частина мережі відповідає за виділення особливостей з кадрів вхідного відеоряду. Дуже часто, в моделях, які роблять виділення особливостей, замість того, щоб навчати з нуля, цю частину замінюють на вже навчену модель. Прикладами вже навчених моделей є – VGG16, VGG19 або ResNet. Ці моделі навчені на якісному та об'ємному датасеті. Оскільки в системах класифікації саму класифікацію зазвичай роблять останні шари, якщо відкинути останній шар ResNet, то отримана система буде ефективною виділяти особливості. Однак, з рисунка1 видно, що обробці піддається кошик зображень, який містить n послідовностей зображень. Оскільки мірність датасетів, які було використано під час виконання даного дослідження, відрізняється від звичайної, то заздалегідь навчену мережу використовувати не можливо.

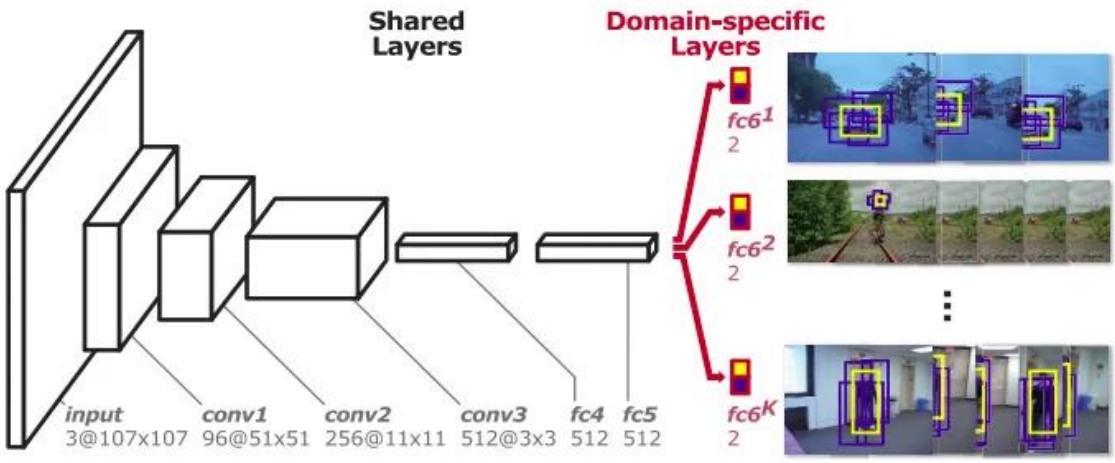


Рис. 1. Архітектура MDNet

Як можна побачити на рис.1, архітектура використовує невелику кількість шарів. Їх значно менше, ніж у звичайних системах виділення особливостей. Це обумовлено тим, що вона продовжує навчатися після етапу навчання під час передбачення. Оскільки відстежуванні об'єкти мають порівняно невеликий розмір в кадрі, збільшення глибини мережі призведе тільки до сповільнення

роботи. Через те, що не треба робити детальну класифікацію об'єкта, використовується бінарний класифікатор, який визначає чи є ціль фоном, чи об'єктом. Також коли використовується глибока мережа на основі CNN, це призводить до значного зменшення зображення, що заважає розв'язанню задачі про знаходження розташування об'єкта. З цих причин, глибока нейронна мережа не використовується.

Друга частина архітектури fc6K – це K гілок повністю пов'язаних шарів. У момент навчання використовується техніка навчання з багатьма доменами. Під доменом мається на увазі джерело інформації. В інформації, взятої з кожного домену, є свої особливості. Цими особливостями може бути розмиття, шуми або кардинальна відмінність фону й об'єкта. Завдяки усередненому навчанню кожного з доменів, можна навчити шари з 1 по 5 на варіативнішій інформації, що може допомогти з адаптацією мережі під час реальної роботи. У такому вигляді, друга частина архітектури використовується тільки на етапі навчання. Коли сама модель починає використовуватися для реальної роботи або тестів, K гілок замінюються на один повністю пов'язаний шар fc6. Під час роботи мережі, ваги цього шару ініціалізуються випадковими значеннями. Це означає, що він буде навчатися після початку використання моделі.

Для навчання під час зворотного поширення використовується Stochastic Gradient Descent (SGD). На етапі навчання використовуються такі коефіцієнти швидкості навчання: 0.0001 для згорткових шарів і 0.001 для повністю зв’язаних шарів. На етапі тестування і реальної роботи використовувались інші коефіцієнти швидкості навчання. На моменті тестування є можливість витратити більше часу на навчання нового шару, оскільки продуктивність на цьому етапі не критична. По завершенню навчання, згорткові шари системи більше не будуть навчатися. Ваги змінюватимуться тільки на шарах із четвертого по шостий. Для четвертого і п'ятого шару, на етапі тестування використовується коефіцієнт швидкості навчання 0.0001, для шостого ж шару використовується коефіцієнт 0.001. На цьому етапі перший кадр треба показати мережі 30 разів, для ініціалізації ваг. Під час реальної роботи програми, перший кадр проганяється 10 разів, для збільшення швидкості роботи, а обидва коефіцієнти швидкості навчання збільшуються в 3 рази для того, щоб мережа швидше реагувала на особливості нового відеоряду.

<u>Модель BOTT</u>

Архітектура моделі BOTT зображена на рис.2.

У кожного кадру з відео система знаходить N обмежувальних рамок. Кожна з рамок виражається через параметри. Кожен параметр, який використовується для визначення рамок наведено далі:

- x, y, z – параметри, що відповідають за розміщення об'єкта;
- w, l, h – параметри відповідають за розміри рамки об'єкта;
- θ – параметр показує кут повороту рамки об'єкта;
- t – параметр показує час, часом у цьому контексті є позиція кадру у відеоряді;

- $c_1, c_2, \cdots, c_C$ – масив із C елементів. C – кількість класів моделі.

Кожен з елементів цього масиву зберігає в собі оцінку ймовірності відношення вмісту рамок об'єкта до конкретного класу моделі.

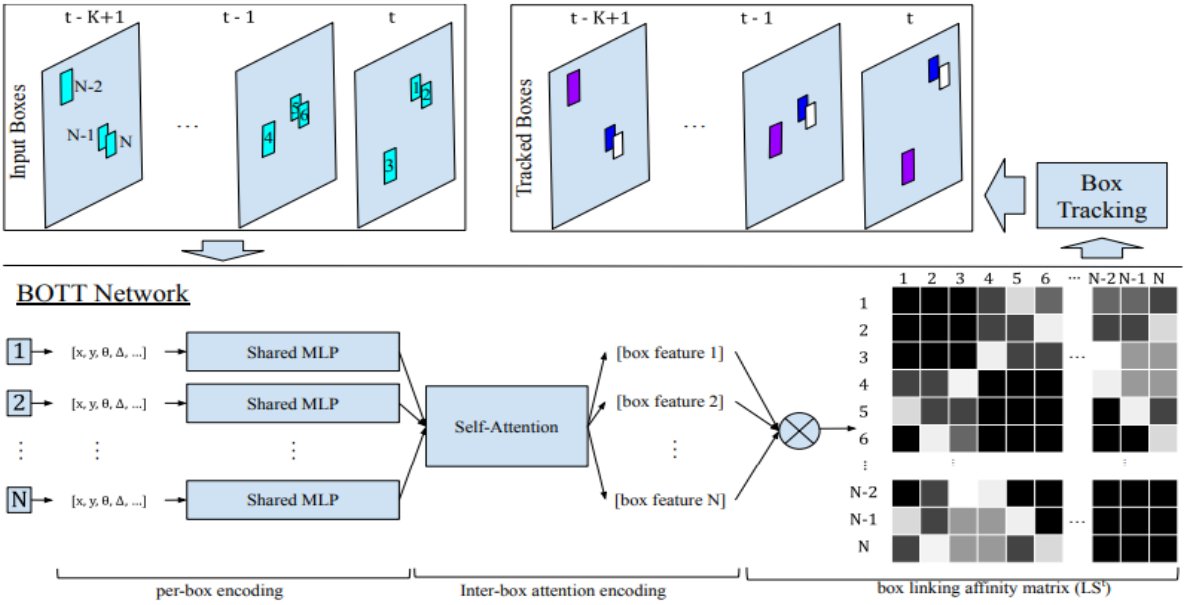


Рис. 2. Архітектура BOTT

У такому форматі дані передаються в мережу BOTT. Сама мережа складається з трьох основних блоків:

- single-box feature encoding
- inter-box encoding with self-attention
- linking scores estimation

Далі кожен із блоків розглядається детальніше.

Single-box feature encoding

Основним завданням цього блоку є виокремлення високорівневих особливостей із геометричного представлення вхідних даних кожної з рамок об'єктів. Оскільки вхідні дані можуть значно відрізнятися одне від одного, для зменшення різниці між значеннями робляться деякі перетворення. Для всіх значень x, y, z береться дельта. Від вхідних значень віднімається мінімальне значення x_{min}, y_{min}, z_{min}, серед усіх вхідних рамок цього поточного кадру. Вхідний кут нахилу кодується у вигляді sin(θ), cos(θ). Для параметра t також береться дельта. Від поточного значення кожної з рамок об'єкта віднімається значення t з кадру, який знаходиться посередині вхідного відеоряду.

Таким чином, оновлені вхідні дані мають такий вигляд: $x - x_{min}$, $y - y_{min}$, $z - z_{min}$, w, l, h, sin(θ), cos(θ), $t - t_{mid}$, $c \ldots c_C$. Після перетворень, ці параметри передаються в N паралельних мереж спільних MLP. Архітектура MLP наведена на рис. 3.

Це звичайна мережа з повністю пов'язаних шарів, головною особливістю якої є те, що кожен із блоків MLP у даній моделі має спільні ваги. Виходом цього

блоку є матриця формату кількість рамок на d, де d – це мірність матриці. Вихідні значення цих шарів є вбудуваннями особливостей кожної з меж об'єктів. Вбудування об'єктів – це подання розташування об'єкта у форматі числа. Ця інформація необхідна для роботи механізму уваги трансформера.

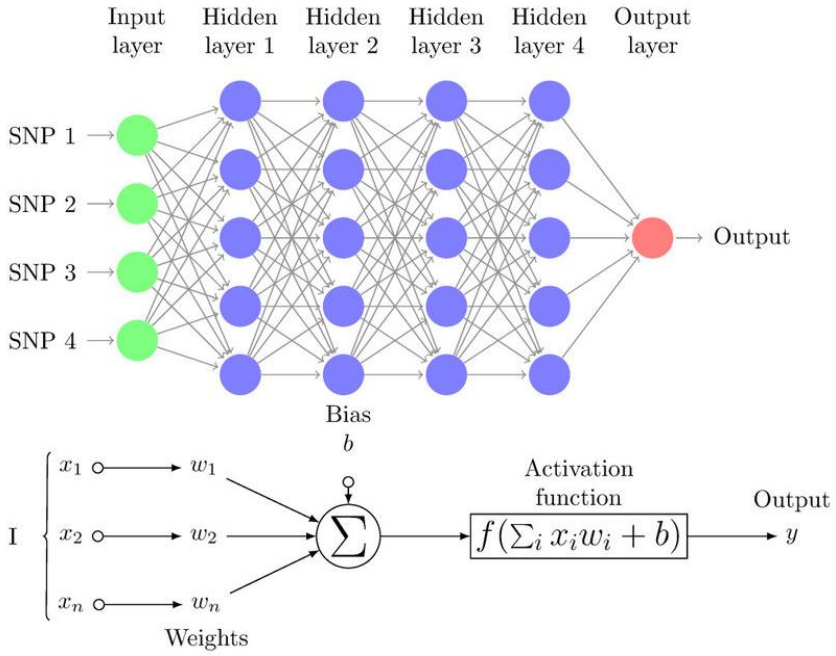


Рис. 3. Архітектура багатошарового персептрона

Inter-Box Encoding with Self-Attention

Завданням блоку кодування з механізмом самоуваги є знаходження взаємозв'язків між вхідними рамками об'єктів. Архітектура цього блоку стандартна для систем, що використовують трансформер. В основі лежить механізм самоуваги, в якому використовується n голів для паралельного опрацювання вхідної послідовності, за якою слідує мережа прямого розповсюдження. Архітектура цього блоку наведена на рис.4.

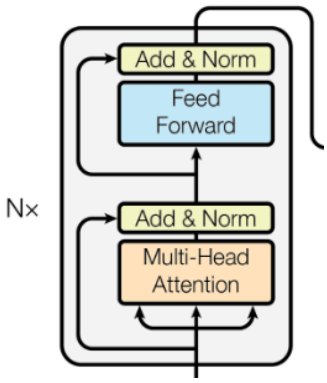


Рис. 4. Архітектура блоку кодування з механізмом самоуваги

Цей механізм особливо корисний, коли крім одного відстежуваного об'єкта в кадрі, присутні об'єкти того самого класу, що дає змогу моделі навчатися передбачати рух об'єкта одразу на кількох прикладах.

Linking Score Estimation

Об'єкт, що відстежується, має схожий контекст протягом усього відеоряду. Вбудовування з позиціювання у трансформері допомагає трансформеру розуміти відносне розташування об'єктів на зображенні. У цьому блоці відбувається нормалізація значень вбудовування меж об'єктів до одиничного розміру. Для визначення наскільки об'єкти схожі між собою, використовується скалярний добуток. Результатом скалярного добутку є Linking Score. Таким чином будується матриця, заповнена значеннями від нуля до одиниці. Це значення показує, який шанс, того, що дві подані межі належать одному й тому самому об’єкту. Виходячи з того, що ближче значення в клітині до одиниці, то вищий шанс, що це один і той самий об'єкт, а що ближче значення до нуля, то шанс менший. Завдяки такому представленню даних, завдання можна привести до бінарної класифікації, що значно зменшує обчислювальні витрати. Матрицю зі значень Linking Score наведено на рис. 5.

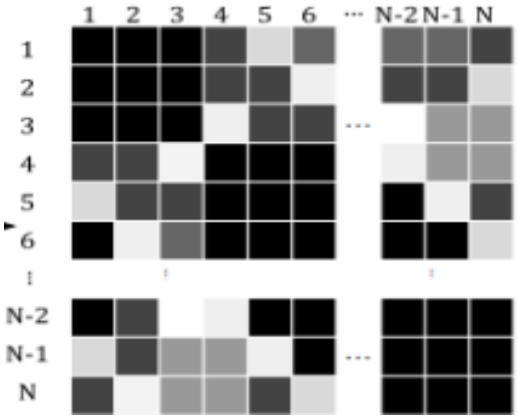


Рис. 5. Матриця зі значень Linking Score

Визначення функції втрати.

Оскільки мету роботи мережі зведено до бінарної класифікації, найефективнішою функцією втрати для такого випадку є функція бінарної кросентропії. Для кожного Linking Score функція втрати розраховується за формулою (1).

$$L_{ij}^{t} = (1-\beta)\left(1-y_{ij}^{t}\right)log\left(1-LS_{ij}^{t}\right) + \beta y_{ij}^{t} log(LS_{ij}^{t}) \qquad (1)$$

Щоб зменшити перенавчання на легких випадках, під час навчання до кросентропії додається маска, яка виключає небажані випадки, які або занадто легкі, або погано впливають на навчання. Це дозволяє уникнути таких випадків:

- міжкласові зв'язки між кордонами;
- зв'язки між кордонами з одного й того самого кадру;

- зв'язки між виявленими межами, які не мають правильного визначеного значення в поданому датасеті. (об'єкти, які були виявлені, хоча в датасеті вони не малися на увазі);
- зв'язки між об'єктами, які перебувають на надто великій відстані один від одного на певному проміжку часу.

Таким чином, функцію втрати можна записати за допомогою формули (2):

$$L_{link} = \frac{\Sigma_t \Sigma_{ij} \left(M_{ij}^t * L_{ij}^t \right)}{\Sigma_t \Sigma_{ij} M_{ij}^t} \quad (2)$$

Обидві моделі були навчені та протестовані на різних датасетах для детальнішого порівняння їхньої продуктивності та точності роботи. Для перевірки було взято такі датасети: VOT2016, VOT2018, VOT2020 і OTB100. Ці датасети використовуються для наукових досліджень у галузі комп'ютерного зору та візуального відстеження об'єктів. Вони складаються з більшої кількості заздалегідь підготовлених зображень та які об'єднані з файлами формату XML. У файлах XML зберігаються дані про межі об'єктів на зображеннях і клас, до якого належить об'єкт. Також, залежно від датасету, у цьому файлі може зберігатися інформація про номер кадру, до якого належить інформація про об'єкт.

Нижче наведено результати порівняння точності моделей, навчених на кожному з представлених датасетів. Як видно з таблиці 1, MDNet показує відчутно кращий результат, завдяки використанню глибшої мережі з виділення особливостей. Однак ці результати наведено без урахування продуктивності систем.

Таблиця 1

Результати порівняння точності моделей

Датасет	Точність BOTT	Точність MDNet
VOT2016	65%	86%
VOT2018	58%	80%
VOT2020	55%	70%
OTB100	60%	75%

Модель тестувалася на двох комп'ютерах з різною продуктивністю. Один з більшою продуктивністю, а другий навпаки – з меншою. Продуктивніший комп'ютер має такі характеристики:

- процесор - i7 7700k

- відеокарта - RTX 3090 ti
- ssd - Samsung EVO
- оперативна пам’ять - ddr4 32Gb

Малопродуктивний комп'ютер - Raspberry Pi і в нього такі характеристики:

- процесор - quad-core ARM Cortex-A72
- ssd - 64Gb
- оперативна пам’ять - 4Gb

Навіть при роботі на високопродуктивному комп'ютері в режимі навчання, моделі MDNet не вдається опрацьовувати відеоряд зі швидкістю 20 кадрів на секунду.

Зі свого боку, модель BOTT стабільно показувала понад 120 кадрів на секунду. Під час тестування на високопродуктивному комп'ютері, не вдалося отримати навіть 1 кадр на секунду від моделі MDNet. Модель BOTT при тих же умовах працює зі швидкістю 30 кадрів на секунду.

Наукова новизна визначається тим, що вперше було обґрунтовано архітектуру інформаційної технології стеження за об’єктами у відеоряді, що підтримує високу точність під час обробки навантажених сцен.

Висновки. Під час детального розгляду різних сценаріїв роботи алгоритмів відстеження видно, що в легких сценах як MDNet, так і BOTT так і показують схожу високу точність. Головна різниця в точності з'являється під час обробки навантажених сцен. Хоча обидві моделі підтримують онлайн роботу, виходячи з результатів тестів, BOTT більше підходить для відстежування в реальному часі. Через низьку продуктивність MDNet не зможе забезпечити навіть базову роботу на більшості пристроїв, тому її використання суттєво обмежене навіть попри вищу точність.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

9. Shiri, F. M., Perumal, T., Mustapha, N., Mohamed, R. (2023). A Comprehensive Overview and Comparative Analysis on Deep Learning Models: CNN, RNN, LSTM, GRU. arXiv preprint arXiv: 2305.17473.
10. Object Tracking in Computer Vision (2024 Guide) [Online]. Available: https://viso.ai/deep-learning/object-tracking/
11. Cui, W., Duan, X., Kong, G., and Long, H. (2023). Siamese network with contrastive learning and adaptive template updating for object tracking. *Journal of Electronic Imaging*, 33(1), doi: 10.1117/1.JEI.33.1.013002.
12. Zhang, H. et al. (2023). SiamST: Siamese network with spatio-temporal awareness for object tracking. *Inf. Sci*, 634, 122–139.
13. Thangavel, J., Kokul, Th., Ramanan, A., Fernando, S. (2023). Transformers in Single Object Tracking: An Experimental Survey. arXiv preprint arXiv: arXiv:2302.11867.

УДК 004.056:004.94

М.О. Алексєєв[1], В.О. Пушков[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕЙМВОРКУ SWIFTUI ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ РОЗРОБКИ ДОДАТКІВ НА ПЛАТФОРМІ IOS

Анотація. Досліджено ефективність фреймворку SwiftUI у розробці мобільних додатків для платформи iOS. У результаті порівняння між фреймворками SwiftUI та UIKit для написання окремих компонентів було виявлено, що SwiftUI є більш ефективним підходом. Розроблено додаток Photogram з використанням SwiftUI та архітектурного шаблону MVVM. Розробка додатка на основі SwiftUI дозволила значно знизити час розробки та спростити процес створення інтерфейсу користувача. Модель-вид-вид (MVVM) дозволив зробити додаток більш структурованим та простим у термінах управління даними та взаємодії з користувачем..

Ключові слова: iOS, фреймворк SwiftUI, Xcode, архітектура MVVM, технологія UIKit, мобільний додаток.

Вступ. Розробка мобільних додатків пройшла довгий шлях, зазнавши багато змін. Якщо брати платформу iOS, то перші програми писалися мовою програмування Objective-C, також розробники мали вручну обробляти керування пам’яттю. Значним кроком було представлення компанією Apple фреймворку SwiftUI. Основним аспектом даного фреймворка є повний перехід на декларативну модель програмування, коли інтерфейс користувача є функцією від стану, відповідно він завжди буде відображати правильний стан при однакових вхідних параметрах. Якщо раніше розробники довгий час використовували імперативний підхід, вручну обновлюючи інтерфейс при оновленні даних, то тепер інтерфейс завжди прив’язаний до даних і саму програму не можна будувати іншим чином. Фактично сам фреймворк заохочує розробників писати більш надійний код.

Для аналізу ефективності фреймворку SwiftUI автором роботи було вибрано розробку прототипу мобільного додатка Photogram для обміну інформацією у вигляді фото між користувачами. Додаток було побудовано на базі архітектури MVVM (Model View ViewModel), у той же час було проаналізовано інші типові архітектури для створення додатків для платформи iOS: MVC, VIPER, Flux, TCA. Кожна архітектура має свої переваги та недоліки, швидкість розгортання, поріг входження, потребу у сторонніх бібліотеках. Коли ми говоримо про мобільні додатки, основним критерієм, який визначає архітектуру, є те, як ми поєднуємо дані з інтерфейсом користувача. Це визначає свої архітектурні особливості побудови мобільних додатків.

Постановка задачі. Огляд та порівняння різних архітектур для побудови мобільних додатків показали, що вибір архітектури залежить від конкретних потреб та вимог проєкту. Архітектура MVVM (Model-View-ViewModel) є

популярною та ефективною, оскільки забезпечує чітку структуру та розподіл відповідальностей між компонентами додатка. Крім того, використання реактивного програмування, наприклад, за допомогою фреймворка Combine, сприяє зручній обробці та оновленню даних додатка.

Основний зміст роботи. Проведений аналіз дозволив визначити оптимальні технології та підходи для розробки мобільного додатка PhotoGram. Визначені вимоги до реалізації додатка з використанням SwiftUI та MVVM з метою створення зручного та ефективного інструменту для зберігання, редагування та обміну фотографіями для користувачів. Порівнюються ефективності двох основних технологій для побудови елементів інтерфейсу користувача в мобільних додатках – SwiftUI та UIKit. Обидві технології створені для розробки додатків в операційній системі iOS. Разом з тим вони мають свої особливості та переваги. Одна з переваг SwiftUI полягає в його декларативному підході до побудови інтерфейсу. Замість написання багатьох ліній коду для налаштування елементів інтерфейсу вручну, на SwiftUI можна використовувати декларативний синтаксис, де розробник описує бажаний стан інтерфейсу. Фреймворк самостійно забезпечує оновлення інтерфейсу згідно з цим станом.

Завдяки такому підходу, SwiftUI дозволяє зменшити кількість коду, який потрібно написати, щоб побудувати той самий інтерфейс. Наприклад, у SwiftUI можна використовувати контейнери, які автоматично налаштовують розміщення та відступи елементів, тим самим спрощуючи процес розмітки інтерфейсу. Крім того, SwiftUI використовує такі концепції, як реюзабельність та компонентна архітектура, що також допомагає скоротити кількість коду. Розробник може створювати власні компоненти, які можна використовувати багаторазово в різних частинах додатка, зменшуючи дублювання коду.

Загалом, використання SwiftUI дозволяє розробникам писати менше коду для побудови інтерфейсу користувача, що сприяє збільшенню продуктивності та ефективності розробки. У додатку Photogram компонента **ProfileActionButtonView** відповідає за відображення кнопок у профілі користувача. Її вигляд та функціональність залежить від контексту: чи є поточний користувач автором профілю, та чи підписаний користувач на цей профіль.

Якщо поточний користувач є автором профілю, відображається кнопка «Edit Profile», яка дозволяє редагувати профіль. При натисканні на цю кнопку відкривається модальне вікно **EditProfileView**, де можна внести зміни до профілю. Якщо поточний користувач не є автором профілю, відображаються кнопки «Follow» і «Message». Кнопка «Follow» дозволяє підписатись або відписатись від профілю. При натисканні на цю кнопку змінюється її стан та відображення тексту залежно від того, чи користувач підписаний на профіль. Кнопка «Message» відкриває можливість надіслати повідомлення користувачу.

Порівняння ефективності SwiftUI та UIKit показало, що SwiftUI має декілька переваг у порівнянні з UIKit. SwiftUI надає більш простий та зручний спосіб побудови інтерфейсу, оскільки використовує декларативний оновлення інтерфейсу користувача відбувається шляхом зміни стану (state) відповідних

елементів View. Під час зміни стану SwiftUI автоматично оновлює відповідні частини інтерфейсу. У UIKit оновлення інтерфейсу вимагає прямого програмного коду для зміни властивостей елементів інтерфейсу. Одним з найважливіших аспектів, який варто взяти до уваги, є можливість одночасного використання UIKit та SwiftUI в одному проєкті. Така гнучкість дозволяє розробникам поєднувати переваги обох бібліотек, що сприяє вибору технології, яка найкраще підходить для вирішення конкретного завдання. Це особливо корисно для існуючих проєктів, які були розроблені на UIKit, але в яких виникає потреба інтегрувати нові елементи інтерфейсу або функціонал на основі SwiftUI. Використання SwiftUI в таких проєктах може зробити код чистішим, більш інтуїтивно зрозумілим та легшим для супроводу.

Загалом, побудова мобільного додатка PhotoGram з використанням SwiftUI та MVVM виявляється ефективним підходом. SwiftUI спрощує розробку інтерфейсу користувача за рахунок декларативного підходу та наявності підхід, де програміст описує бажаний стан інтерфейсу, а не вказує кроки для його побудови. В SwiftUI також доступна багата бібліотека вбудованих елементів інтерфейсу, що спрощує розробку. Однак на даний момент SwiftUI може мати деякі обмеження порівняно з UIKit, особливо щодо розширеної функціональності, яку пропонує UIKit.

Порівняння механізму оновлення інтерфейсу користувача показало, що SwiftUI та UIKit мають різні підходи до оновлення інтерфейсу. У SwiftUI вбудованих елементів інтерфейсу. MVVM надає чітку структуру та розділення відповідальностей між компонентами додатка. Однак, перед вибором SwiftUI для побудови додатка необхідно врахувати його обмеження порівняно з UIKit та оцінити, наскільки важлива розширена функціональність для конкретного проєкту.

Наукова новизна роботи полягає отриманих результатів визначається тим, що вперше досліджена ефективність фреймворку SwiftUI та запропоновано вибір оптимальної архітектури для побудови мобільних додатків. У результаті порівняння між фреймворками SwiftUI та UIKit для написання окремих компонентів було виявлено, що SwiftUI є більш ефективним підходом. Завдяки декларативному синтаксису SwiftUI можна зменшити кількість написаного коду для розміщення об'єктів у користувацькому інтерфейсі. Це дозволяє прискорити процес розробки та полегшити його розуміння.

Висновки. Основна перевага SwiftUI полягає в його простому та зрозумілому синтаксисі. Розробники можуть використовувати декларативний підхід до побудови інтерфейсу, описуючи, як повинен виглядати інтерфейс, а не як його побудувати крок за кроком. Це дозволяє скоротити кількість написаного коду та полегшує розуміння структури додатка. Крім того, SwiftUI надає миттєве оновлення інтерфейсу. Це означає, що будь-які зміни в коді негайно відображаються на екрані, що спрощує процес тестування та налагодження. Розробники можуть вносити зміни та бачити результат миттєво, що дозволяє ефективно використовувати час та зусилля. Ще однією перевагою SwiftUI є велика кількість вбудованих компонентів, що спрощує розробку інтерфейсу.

Розробники можуть використовувати готові компоненти, такі як кнопки, тексти, списки та інші, що знижує час та зусилля, необхідні для побудови інтерфейсу з нуля. У практичній частині диплому виконаний опис розробленого додатка Photogram з використанням SwiftUI та архітектурного шаблону MVVM. Розробка додатка на основі SwiftUI дозволила значно знизити час розробки та спростити процес створення інтерфейсу користувача. Модель-вид-вид (MVVM) дозволив зробити додаток більш структурованим та простим у термінах управління даними та взаємодії з користувачем.

Проведено порівняння мов програмування Swift та Objective-C, а також фреймворків UIKit та SwiftUI. Swift, мова програмування, розроблена компанією Apple, має простий синтаксис та широкі можливості, що полегшують розробку. Objective-C, хоча і є давнішою мовою, все ще використовується в розробці для платформи iOS. Однак, Swift має переваги у відношенні продуктивності та зрозумілості коду. Усе це робить SwiftUI привабливим вибором для розробки мобільних додатків, забезпечуючи зменшення кількості написаного коду для розміщення об'єктів у користувацькому інтерфейсі та простішу модель зв'язування UI та стану.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sahar, A., Clayton, C. «iOS 13 Programming for Beginners: Get started with building iOS apps with Swift 5 and Xcode 11» / A. Sahar, C. Clayton. Birmingham: Packt Publishing, 2020.822 p.
2. Head First. Патерни проектування / Ерік Фрімен, Елізабет Робсон, Кеті Сьерра і Берт Бейтс; пер. з англ. Г. Якубовська – Харків : ВД «Фабула», 2020. – 672 с.
3. «Swift vs Objective-C: A Look at iOS Programming Languages.» / KnowledgeHut Blog. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.knowledgehut.com/blog/programming/swift-vs-objective-c.
4. Eidhof, C., Kugler, F. «Thinking in SwiftUI» / Chris Eidhof, Florian Kugler. – Independently published, 2020. – 168 p.

УДК 004:02

Є.В. Руксов[1], Б.І. Мороз[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ 3D-ОБ'ЄКТІВ ЯК СКЛАДОВА ГЕНЕРАТИВНИХ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ВИРОБІВ

Анотація. У роботі запропоновано інтегровану концепцію вдосконалення автоматизованого робочого місця конструктора аеродинамічних виробів (АРМ КАВ) шляхом поєднання нового функціонального представлення тривимірних форм із моделями машинного навчання. Підхід ґрунтується на трактуванні форми тривимірного об'єкта як орбіти фігури відносно дії групи подібності та поданні замкнених топологічно простих поверхонь за допомогою додатної функції радіусу від сферичних кутових координатах з подальшим розкладом у двовимірний ряд Фур'є. Отримані коефіцієнти Фур'є утворюють впорядковану матрицю векторів, яку можна інтерпретувати як послідовність токенів, придатних для інтеграції з генеративними моделями типу Transformer. У межах вдосконаленої архітектури АРМ КАВ це функціональне представлення виступає єдиною «мовою» зв'язку між (i) моделлю на основі Transformer, що за текстовим описом та фізичними вимогами генерує 3D-форми у вигляді набору векторів, складених з коефіцієнтів розкладу Фур'є, та (ii) PINN-подібним модулем, який апроксимує розв'язки рівнянь Нав'є-Стокса в околі згенерованої поверхні, використовуючи те саме представлення як крайові умови. Така інтеграція дає змогу зменшити розмірність задачі навчання моделі, спростити зв'язок між геометрією та фізикою й частково автоматизувати ранні етапи проектування, замінюючи ручне 3D-моделювання автоматичною генерацією та оцінюванням параметрів прототипу виробу. У роботі окреслено структуру запропонованої системи, проаналізовано її переваги та поточні обмеження (зокрема топологічні та обчислювальні), а також сформульовано напрями подальших досліджень.

Ключові слова: *3D-моделювання, функціональне представлення, Transformer, Physics-Informed Neural Networks, автоматизоване робоче місце.*

Вступ. Підвищення рівня автоматизації технологічного виробництва завжди розглядалося як один із ключових драйверів довгострокового економічного зростання. Для сфери конструювання аеродинамічних виробів це означає скорочення часу на кожен етап виробничого циклу, і одним з найбільш значущих для всього виробничого ланцюга є перший етап тривимірного моделювання та теоретичних розрахунків фізичних характеристик. Від якості та швидкості процесів на цьому етапі залежать загальні витрати на серійне виробництво та навіть на експлуатаційне обслуговування.

Автоматизація створення теоретичної моделі виробу із високою якостю такого моделювання призведе до зменшення кількості натурних випробувань масштабованих прототипів, до зниження витрат на створення та модифікацію таких моделей в процесі тестування. Адже процес тривимірного моделювання потребує значних часових витрат конструктора аеродинамічних виробів (КАВ), і кожен цикл первинного випробування прототипу (або в комп'ютерній

симуляції, або в зменшеній версії аеродинамічної труби) потребує ручного внесення корективів у 3D-модель виробу.

Останнє десятиліття позначилося стрімким розвитком генеративних моделей машинного навчання, насамперед моделей типу Transformer, які успішно застосовуються для генерування тексту та зображень. Враховуючи високу ефективність таких моделей машинного навчання, можна висунути гіпотезу про можливість використання цих досягнень для конструювання тривимірних об'єктів з цільовими фізичними властивостями. Однак, наразі бракує досліджень в цьому напрямку. Однією з причин такого становища є складність кодування (представлення) тривимірних форм в прийнятний для моделей типу Transformer формат із збереженням якості. А також найбільшою перепоною для впровадження цієї технології у сфери, де домінують складні абстрактні концепції математичної фізики (наприклад диференціальні рівняння в частинних похідних, ДРЧП), є велика різниця між форматами представлення даних, які описують генерований об'єкт та фізичне середовище.

Аналіз останніх досліджень. У роботі [1] описується загальна архітектура вдосконаленого варіанту автоматизованого робочого місця (АРМ) КАВ. А у статті [2] запропоновано трактувати форму тривимірного об'єкта як орбіту фігури відносно групи подібності та пропонується механізм переходу до функціонального представлення поверхні через періодичну функцію радіусу від сферичних кутових координат з подальшим розкладом у двовимірний ряд Фур'є.

Теоретичний фундамент для такого погляду на форму задають праці з обчислювальної топології та теорії інваріантів. Огляд [3] демонструє, що топологічно орієнтовані методи аналізу форми (скелетні моделі, графи суміжності, інваріанти відносно груп перетворень) є природною основою для інваріантних дескрипторів 3D-об'єктів. Класична монографія Мумфорда [4] з геометричної теорії інваріантів формалізує роботу з орбітами груп дій та фактор-просторами, що безпосередньо використовується в [2] для опису форми як факторизації простору фігур за дією групи подібності. Таким чином, функціональне представлення в [2] узгоджене з усталеною математичною традицією опису класів еквівалентності фігур.

У сфері подання 3D-об'єктів у математичних просторах, зручних для нейромереж, важливу роль відіграють роботи, що пропонують деякі подібні до функціонального представлення. В роботі, присвяченій Occupancy Networks [5], автори демонструють можливість кодувати 3D-геометрію не як воксельну сітку, а як ймовірнісну функцію, де для кожної точки простору задається ймовірність належності об'єкту. Це зміщує акцент із дискретних структур (mesh, voxel grid) до неперервних функцій, більш придатних для апроксимаційного машинного навчання. Подібна ідея використовується в [2], де поверхня описується радіальною функцією у сферичних координатах, а геометрія кодується в наборі Фур'є-коефіцієнтів, які тлумачаться як вектори-токени.

Окремий пласт робіт присвячений безпосередньо генеративним моделям 3D-форм. MSG-Voxel-GAN [6] демонструє можливості різних GAN-архітектур

для генерації 3D-об'єктів у воксельному представленні. В моделі PolyGen [7] запропоновано авторегресивний підхід до генерації polygon mesh, де тривимірний об'єкт описується послідовністю вершин та граней і моделюється як послідовність токенів. Незважаючи на те, що в роботі [2] акцент переноситься з PolyGen-подібних схем на більш абстрактне функціональне кодування, саме [7] демонструє принципову можливість застосувати Transformer-архітектури до 3D-mesh у вигляді послідовності токенів. Це безпосередньо мотивує використовувати функціонального представлення з [2] як джерела «токенів форми» для Transformer в АРМ КАВ [1].

Ще один важливий напрям – фізично-орієнтовані нейромережі для розв'язання ДРЧП. У фундаментальних роботах [8; 9] запроваджено концепцію Physics-Informed Neural Networks (PINNs), де диференціальні рівняння, крайові та початкові умови входять до функції втрат, а розв'язок апроксимується нейромережею. Подальші дослідження, зокрема [10], розширюють цю ідею в напрямі енергоефективних або квантово-підсилених PINNs для задач кліматичного моделювання. У статті [1] PINNs-апарат розглядається як ключовий блок для апроксимації розв'язків рівнянь Нав'є-Стокса в околі згенерованої форми, що дозволяє інтегрувати симуляцію аеродинамічних характеристик безпосередньо в АРМ КАВ, мінімізуючи потребу в повноцінних CFD-розрахунках на ранніх етапах пошуку оптимальної форми.

Статті [1; 2] виступають в якості пропозиції щодо поєднання описаних вище напрямів задля підвищення рівня автоматизації процесу 3D-моделювання: функціональне представлення форми використовується як компактне кодування тривимірного об'єкта у вигляді послідовності токенів для генеративної моделі типу Transformer, яка інтегрована в АРМ КАВ і працює у зв'язці з PINN-модулем для оцінювання різних аеродинамічних показників об'єкта.

Мета дослідження. Формування цілісної концепції інтеграції нового функціонального представлення форми 3D-об'єкта в структуру вдосконаленого автоматизованого робочого місця конструктора аеродинамічних виробів (АРМ КАВ), що включає генеративні нейронні мережі класу Transformer та PINNs-моделі для симуляції аеродинамічних процесів.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Коротко описати новий метод функціонального представлення тривимірних об'єктів.
2. Показати, яким чином отримане функціональне представлення може бути інтерпретоване як послідовність нормованих векторів, придатних для використанні в контексті моделей типу Transformer.
3. Інтегрувати цей підхід у структуру вдосконаленого АРМ КАВ.
4. Окреслити очікувані переваги та обмеження запропонованої архітектури і напрями подальших досліджень.

Опис функціонального представлення. У роботі [2] запропоновано розглядати форму тривимірного об'єкта як клас подібності, який у термінах

теорії груп відповідає орбіті фігури відносно дії групи подібності Sim(n), що включає зсув, поворот і масштабування в просторі $\mathbb{R}^n$.

Факторизація простору всіх фігур за дією цієї групи дозволяє сформувати фактор-простір форм, де кожна точка представляє цілу орбіту геометрично подібних фігур. Для практичного використання вводиться калібрування: центр мас фігури переноситься в початок координат, масштаб нормується так, щоб найближча до центру точка мала одиничну відстань, а орієнтація фіксується за допомогою вибраної осі. Це дозволяє відокремити «чисту» форму від тривіальних перетворень положення та розміру.

Для топологічно простих замкнених поверхонь (гомеоморфних сфері) пропонується перейти до сферичних координат і описати поверхню через функцію радіусу від двох кутових аргументів r(θ, φ), визначену на квадратній області [0, 2π] × [0, 2π], з умовою періодичності по обох змінних. Загалом, це перетворення можна записати так:

$$f(\theta,\varphi) = \begin{cases} r(\theta,\varphi)\sin\theta\cos\dfrac{\varphi}{2} \\ r(\theta,\varphi)\sin\theta\sin\dfrac{\varphi}{2} \\ r(\theta,\varphi)\cos\theta \end{cases}, \qquad \theta \in [0,2\pi], \varphi \in [0,2\pi] \tag{1}$$

Вимога додатності r(θ, φ) > 0 гарантує коректну топологію поверхні. Для забезпечення цієї умови може використовуватися логарифмування.

Далі ця функція розкладається в ряд Фур'є за допомогою швидкого перетворення Фур'є (яке присутнє в багатьох мовах програмування). А для оберненого перетворення застосовується відповідні алгоритми, які входять в пакет fast Fourier transform (FFT).

Періодична функція g(θ, φ) розкладається в двовимірний тригонометричний ряд Фур'є, де для кожної пари гармонік обчислюються чотири дійсні коефіцієнти. Сукупність цих коефіцієнтів можна інтерпретувати як матрицю векторів розмірності 4, тобто як впорядкований ряд векторних токенів. Практична реалізація базується на швидкому перетворенні Фур'є (FFT), що забезпечує прийнятну обчислювальну швидкість.

Таким чином, замість дискретної «хмари точок» поверхні 3D-об'єкта (як це робиться в більшості сучасних генераторів тривимірних форм) отримуємо компактне функціональне представлення у вигляді послідовності нормованих векторів, сумою яких (частковими сумами ряду) відновлюється фігура. Це представлення узгодженим із форматом вхідних даних для Transformer моделей.

Опис вдосконаленого АРМ КАВ та інтеграція функціонального представлення. У роботі [1] було виконано аналіз механізмів підвищення рівня автоматизації АРМ КАВ. Стандартне АРМ включає:

– робочу станцію з CAD ПЗ для побудови 3D-моделей;

– CFD-симулятор (ANSYS Fluent, COMSOL, OpenFOAM тощо) для розв’язання рівнянь Нав’є-Стокса;
– систему візуалізації (ParaView, VisIt) та формат VTK;
– 3D-принтер і малу аеродинамічну трубу для натурних випробувань зменшених прототипів.

Такий комплекс забезпечує високий рівень точності розрахунків і наочності результатів, але етап первинного створення та подальшої модифікації 3D-моделі залишається переважно ручним і вимагає значних часових витрат дороговартісного фахівця.

На основі аналізу сучасних генеративних моделей для 3D-об’єктів (PolyGen, AtlasNet, 3D-R2N2 та ін.) і PINNs-підходів для розв’язання ДРЧП запропоновано вдосконалену структуру АРМ КАВ. У ній класичний CFD-симулятор замінюється (або частково доповнюється) інтегрованим блоком глибокого навчання, що складається з двох взаємодіючих мереж:

1. Генеративна модель типу Transformer, яка за текстовим описом та цільовими аеродинамічними характеристиками генерує 3D-форму виробу у вигляді функціонального представлення (матриця векторів Фур’є-коефіцієнтів).
2. PINN-модель, що апроксимує розв’язки рівняння Нав’є-Стокса в околі поверхні виробу, використовуючи згенеровану форму як крайові умови. Ця модель може значно відрізнятися від класичної PINN, адже вона також повинна використовувати функціональне представлення, як «універсальну мову» для опису як тривимірних форм так і векторних динамічних полів (які є розв’язками ДРЧП еволюційного типу).

Далі на рис. 1 представлено схему такої інтеграції функціонального представлення у вдосконалене АРМ КАВ.

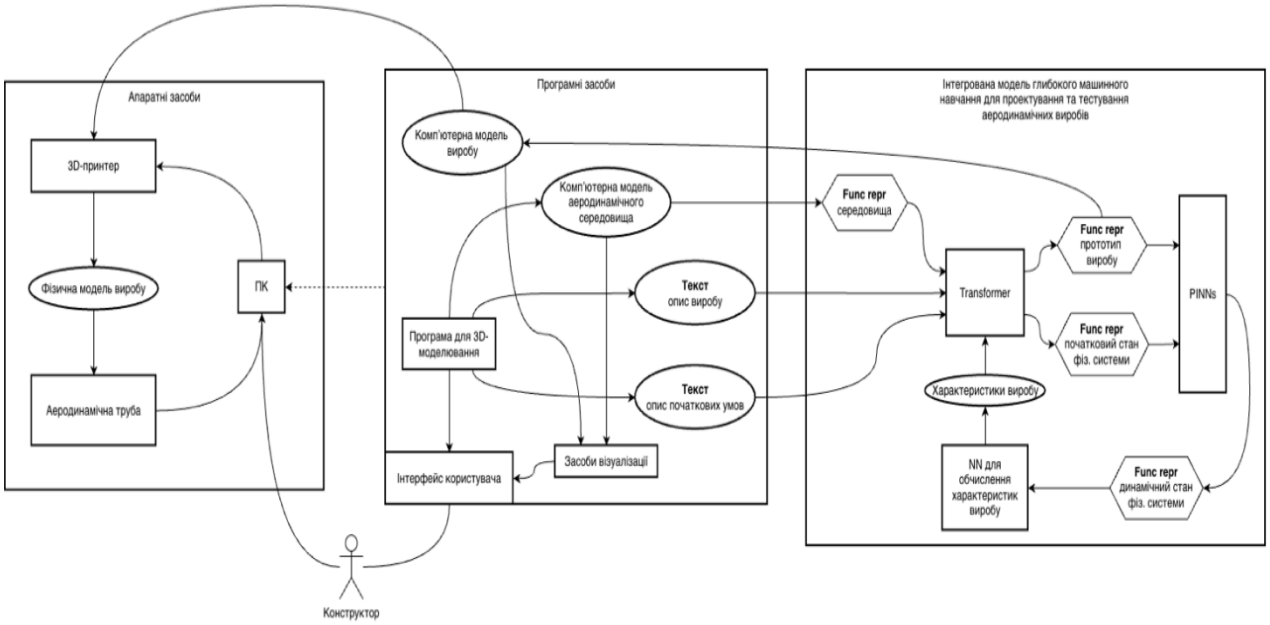


Рис. 1. Схема інтеграції функціонального представлення в АРМ КАВ

До очікуваних переваг такого підходу віднесемо:

- універсалізацію даних: з'являється можливість встановлення зв'язків між тривимірними формами об'єктів та рішеннями задач математичної фізики;
- зменшення розмірності задачі навчання: генеративна модель працює з рядом коефіцієнтів, а не з мільйонами точок поверхні;
- інтеграцію ШІ-моделей у АРМ КАВ: генерація форми, симуляція аеродинаміки та візуалізація пов'язуються єдиним форматом представлення;
- підвищення рівня автоматизації: часткове або повне усунення ручного 3D-моделювання на ранніх етапах пошуку оптимальної форми.

Основними обмеженнями на поточному етапі є:

- звуження до класу топологічно простих поверхонь нульового роду, що накладає обмеження на типи виробів;
- складність роботи з мультизначними функціями (або set-value function) при вигнутих поверхнях;
- значні вимоги до обчислювальних ресурсів для тренування великих генеративних моделей і PINNs.

Напрями подальших досліджень включають: узагальнення методу на поверхні довільного роду, розробку стійких алгоритмів роботи з мультизначними функціями, а також експериментальну валідацію інтегрованої архітектури на типових задачах проектування аеродинамічних виробів.

Висновки. В результаті було запропоновано загальну схему інтеграції новітнього функціонального представлення 3D-об'єктів у вдосконалене автоматизоване робоче місце конструктора аеродинамічних виробів. Визначено переваги та обмеження функціонального представлення в контексті комп'ютерного моделювання аеродинамічних виробів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Євгеній Руксов, Борис Мороз. Аналіз методів підвищення рівня автоматизації робочого місця конструктора аеродинамічних виробів. – System technologies, 2025. – 10 с. DOI: https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-157-2025-10.
2. Євгеній Руксов, Борис Мороз. Функціональне представлення 3D-об'єктів, як метод універсалізації даних в генеративних моделях машинного навчання. – Computer-integrated technologies: education, science, production, 2025. – 14 с. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-29.
3. Silvia Biasotti. Computational topology methods for shape modelling applications. – Dissertation, Università degli studi di Genova. 2004. – 194 с. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/37832978.pdf.
4. David Mumford, John Fogarty, Frances Kirwan. Geometric Invariant Theory. – Springer. 1994. – 294 с. URL: https://link.springer.com/book/9783540569633.

5. Lars Mescheder, Michael Oechsle, Michael Niemeyer, Sebastian Nowozin, Andreas Geiger. Occupancy Networks: Learning 3D Reconstruction in Function Space. – Archive of scientific articles arXiv, 2019. – 11 c. arXiv: 1812.03828.
6. Bingxu Wang, Jinhui Lan, Feifan Li. MSG-Voxel-GAN: multi-scale gradient voxel GAN for 3D object generation. – Multimedia Tools and Applications. 2024. – 17 c. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-023-17116-9.
7. Charlie Nash, Yaroslav Ganin, S. M. Ali Eslami, Peter W. Battaglia. PolyGen: An Autoregressive Generative Model of 3D Meshes. – Archive of scientific articles arXiv, 2020. – 16 c. arXiv: 2002.10880.
8. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. Physics Informed Deep Learning (Part I): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 22 c. arXiv: 1711.10561.
9. Maziar Raissi, Paris Perdikaris, George Em Karniadakis. Physics Informed Deep Learning (Part II): Data-driven Solutions of Nonlinear Partial Differential Equations. – Archive of scientific articles arXiv, 2017. – 19 c. arXiv: 1711.10566.
10. Siddhant Dutta, Nouhaila Innan, Sadok Ben Yahia, Muhammad Shafique. AQ-PINNs: Attention-Enhanced Quantum Physics-Informed Neural Networks for Carbon-Efficient Climate Modeling. – Archive of scientific articles arXiv, 2024. – 6 c. arXiv: 2409.01626.

УДК 004.4:004.42

В.В. Спірінцев[1], О.С. Бурлака[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕНЬ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ, ПІДТРИМУВАНІСТЬ ТА ПРОЦЕС РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Анотація. В роботі досліджено вплив архітектурних рішень на продуктивність, підтримуваність та процес розробки програмного забезпечення (ПЗ) на прикладі монолітної та мікросервісної архітектури. Проведено аналіз архітектурних особливостей, переваги, недоліки та сфери застосування кожної з архітектур. Проведено порівняльний аналіз на основі низки метрик, а також розглянуто результати тестування продуктивності. На основі отриманих даних зроблено висновки щодо доцільності застосування кожного з архітектурних підходів в залежності від вимог до системи.

***Ключові слова**: моноліт, мікросервіси, архітектура, продуктивність, масштабованість, підтримуваність, DevOps, deploy, бізнес-логіка.*

Вступ. Архітектура ПЗ відіграє ключову роль у визначенні того, як система працює, масштабується та підтримується протягом усього життєвого циклу. Сучасні підходи до побудови архітектури, зокрема монолітна та мікросервісна, мають суттєві відмінності, що впливають на продуктивність, процеси розробки, тестування, впровадження та експлуатацію. Монолітна архітектура передбачає створення єдиного цілісного застосунку, тоді як мікросервісна складається з набору малих незалежних сервісів, що взаємодіють між собою через API. Кожен підхід має свої переваги та недоліки, тому вибір архітектури повинен базуватися на вимогах до системи, масштабі проєкту та ресурсах команди.

Постановка задачі. Метою цього дослідження є визначення впливу монолітної та мікросервісної архітектур на ключові характеристики ПЗ:

- продуктивність (час відповіді, затримки, навантаження на систему);
- підтримуваність (простота внесення змін, тестування, модульність);
- процес розробки (швидкість впровадження, складність DevOps-процесів, командна взаємодія).

Для цього проведено аналіз архітектурних патернів, створено тестове середовище для вимірювання продуктивності та виконано порівняльний аналіз за визначеними метриками.

Основний зміст роботи. Розглянемо архітектурні особливості монолітної та мікросервісної архітектури.

Монолітна архітектура - це традиційний підхід до розробки ПЗ, де вся система реалізована як єдиний застосунок з однією кодовою базою та спільною бізнес-логікою. Моноліт є самодостатнім і працює як цілісна структура, що поєднує всі модулі, функції та інтеграції в одному виконуваному середовищі. Основними характеристиками моноліту є: єдина кодова база та централізована

структура; тісно пов'язані компоненти (будь-яка зміна в одному модулі може впливати на інші); єдиний процес розгортання (one deploy → весь застосунок оновлено); єдина база даних; висока продуктивність, завдяки відсутності мережевих викликів між компонентами.

Переваги монолітної архітектури:

- простота розробки – єдина кодова база знижує когнітивне навантаження;
- швидке збирання продукту на ранніх етапах – зручніше запускати MVP;
- легка деплоймент-модель - один виконавчий файл чи директорія;
- просте тестування – end-to-end тести охоплюють увесь застосунок;
- висока продуктивність – внутрішні виклики реалізуються в пам'яті, без мережевих затримок;
- легкість налагодження – вся логіка знаходиться в одному місці.

Недоліки моноліту:

- проблеми масштабування – масштабувати окремі модулі неможливо, лише весь застосунок;
- складність підтримки – чим більше зростає кодова база, тим важче вносити зміни;
- повільніший релізний цикл – невелика зміна вимагає повного оновлення системи;
- надійність – злам у одному модулі може впливати на всю систему;
- організаційні обмеження – важко розподіляти роботу між багатьма командами.

Враховуючи зазначені особливості, можна зазначити, що моноліт залишається ефективним рішенням для невеликих проєктів, стартапів, систем із прогнозованим навантаженням та у випадках, коли важливі швидкість розробки і простота.

Мікросервіси – це архітектурний стиль у якому система складається з набору невеликих незалежних сервісів. Кожен сервіс має власну бізнес-логіку, окрему базу даних і може розгортатися незалежно від інших. Netflix, Atlassian та багато інших компаній перейшли до мікросервісів через потребу масштабуватися, прискорити розробку та забезпечити більш стабільні операції.

Основні характеристики мікросервісів:

- кожен сервіс має власний життєвий цикл;
- комунікація між сервісами здійснюється через HTTP/gRPC або меседж-брокери, такі як RabbitMQ;
- незалежний деплоймент кожного компонента;
- децентралізоване управління даними;
- наявність окремих команд за кожен сервіс.

Переваги мікросервісної архітектури:

- гнучке масштабування – масштабуються тільки ті сервіси, які мають навантаження;
- висока відмовостійкість – збій одного сервісу не виводить з ладу всю систему;

- прискорений деплоймент – окремі сервіси можуть оновлюватися кілька разів на день;
- покращена підтримуваність – менші кодові бази легше розуміти;
- автономність команд – кожна команда має повний контроль над своїм сервісом;
- гнучкість технологій – кожен сервіс може бути написаний на різній мові програмування або із застосуванням різних фреймворків.

Недоліки мікросервісів:

- складність DevOps-процесів – CI/CD, моніторинг, логування, трасування;
- мережеві затримки між сервісами – кожна взаємодія сервісів потребує мережевого запиту;
- дорожча підтримка – кожен сервіс потребує окремих пайлайнів, тестів, моніторингу;
- неоднорідність технологій може ускладнювати підтримку;
- підвищена складність тестування;
- ризик development sprawl – надмірна кількість сервісів при слабкому контролі.

Враховуючи зазначені особливості, можна зазначити, що мікросервісна архітектура найкраще підходять для великих систем з високими вимогами до масштабованості, гнучкості та розділення команд.

Для здійснення дослідження в роботі було розроблено два тестових проєкти:

- монолітний застосунок (Java + Spring boot);
- мікросервісна система з 4 сервісів (Java + Spring boot + Feign Clients для комунікації).

Головний клас проєкту з монолітною архітектурою (рис. 1) містить наступні пакети: Cart (логіка керування Cart), Client (логіка керування Client), Email (логіка керування електронною поштою), Feedback (логіка керування відгуками), jwt (логіка керування аутентифікацією та Json Web Tokens), order (логіка керування Замовлень), product (логіка керування Продуктами).

```
7  @SpringBootApplication   byraxd *
8  @EnableCaching
9  public class FoodDeliveryAppApplication {
10
11     public static void main(String[] args) {   byraxd
12         SpringApplication.run(FoodDeliveryAppApplication.class, args);
13     }
14 }
```

Рис. 1. Головний клас проєкту з монолітною архітектурою

На рис. 2 – 4 наведено приклад пакету Cart (логіка керування Cart).

```java
61          @Override  1 usage  byraxd
62          public Cart addProductToCart(Long clientId, ProductToCartRequest productToCartRequest) {
63              ValidateUtils.validateId(clientId);
64              ValidateUtils.validateId(productToCartRequest.productId());
65
66              Cart cart = cartRepository.findCartByClient(findClientByClientId(clientId));
67
68              Product product = productRepository.findById(productToCartRequest.productId()).orElseThrow(() -> {
69                  log.error("Product with id {} not found", productToCartRequest.productId());
70                  return new ProductNotFoundException("Product with id " + productToCartRequest.productId() + " not found");
71              });
72
73              CartProduct cartProduct = CartProduct
74                      .builder()
75                      .cart(cart)
76                      .product(product)
77                      .quantity(productToCartRequest.quantity())
78                      .build();
79              cartProductRepository.save(cartProduct);
80
81              cart.getCartProducts().add(cartProduct);
82              return cartRepository.save(cart);
83          }
84
85          @Override  1 usage  byraxd
86          public Cart removeProductFromCart(Long clientId, Long cartProductId) {
87              ValidateUtils.validateId(clientId);
88              ValidateUtils.validateId(cartProductId);
89
90              Cart cart = cartRepository.findCartByClient(findClientByClientId(clientId));
91
92              CartProduct cartProduct = cartProductRepository.findById(cartProductId).orElseThrow(() -> {
93                  log.error("Product with id {} not found", cartProductId);
94                  return new ProductNotFoundException("Product with id " + cartProductId + " not found");
95              });
```

Рис. 3. Сервісна логіка Корзини

```java
12  @RestController  byraxd
13  @RequestMapping("/api/{clientId}/cart")
14  public class CartController {
15
16      @Autowired
17      private CartService cartService;
18
19      @GetMapping  byraxd
20      public ResponseEntity<Cart> getCartByClientId(@PathVariable("clientId") Long clientId) {
21          return ResponseEntity.ok(cartService.getCartByClientId(clientId));
22      }
23
24      @PostMapping  byraxd
25      public ResponseEntity<Cart> createCart(@PathVariable("clientId") Long clientId) {
26          return new ResponseEntity<>(cartService.createCart(clientId), HttpStatus.CREATED);
27      }
28
29      @PutMapping("/add")  byraxd
30      public ResponseEntity<Cart> addProductToCart(@PathVariable("clientId") Long clientId, @RequestBody ProductToCartRequest productToCartRequest) {
31          return ResponseEntity.ok(cartService.addProductToCart(clientId, productToCartRequest));
32      }
33
34      @PutMapping("/remove/{cartProductId}")  byraxd
35      public ResponseEntity<Cart> removeProductFromCart(@PathVariable("clientId") Long clientId, @PathVariable Long cartProductId) {
36          return ResponseEntity.ok(cartService.removeProductFromCart(clientId, cartProductId));
37      }
38
39  }
```

Рис. 2. Контролер Корзини

```
13  @JsonIdentityInfo(  byraxd
14          generator = ObjectIdGenerators.IntSequenceGenerator.class,
15          property = "@id"
16  )
17  @Entity
18  @Getter
19  @Setter
20  @AllArgsConstructor
21  @NoArgsConstructor
22  @Builder
23  @Table(name = "carts")
24  public class Cart {
25
26      @Id
27      @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
28      private Long id;
29
30      @OneToOne
31      @JoinColumn(name = "client_id", nullable = false)
32      private Client client;
33
34      @OneToMany(mappedBy = "cart", cascade = CascadeType.ALL, fetch = FetchType.LAZY)
35      private List<CartProduct> cartProducts;
36
37  }
```

Рис. 4. Модель Корзини

Загальна схема сервісів мікросервісної системи:

- client-service – повертає дані користувача;
- order-service – повертає замовлення користувача;
- product-service – повертає дані продуктів;
- feedback-service – повертає дані відгуків;
- email-service – працює над відправкою електронної пошти.

Для комунікації між сервісами використано FeignClients які інтегровані в Spring boot (рис.5).

```
@FeignClient(name = "client-service", url = "client service")  no usages  byraxd *
public interface ClientServiceClient {
    @GetMapping("/api/clients/{id}")  new *
    Client getClientById(@PathVariable Long id);
}
```

Рис.5. Створення Feign-клієнта для виклику REST API іншого мікросервісу в системі

Для тестування було використано ПК з наступними апаратними характеристиками: 32 GB RAM, SSD 1 TB, Ryzen 5 5600, 6 – cores, 12 – threads. Заміри виконувалися 100 разів для кожного застосунку.

Тестувались наступні метрики (таблиця 1):

- середній час відповіді;
- максимальний час відповіді;
- стабільність під навантаженням;
- затримки між сервісами (для мікросервісів).

Таблиця 1.

Результати тестування продуктивності

Метрика	Моноліт	Мікросервіси
Середній час відповіді, мс	48	73
Макс. час відповіді, мс	112	184
Пікова пропускна здатність (RPS)	820	670
Середня латентність між сервісами (rabbit MQ), мс	–	14
Ресурсоспоживання CPU при навантаженні, %	35	47
Ресурсоспоживання RAM при навантаженні, MB	2071	2456
Середня кількість внутрішніх викликів для одного запиту	1	3

Аналіз таблиці 1 показав, що моноліт демонструє кращу продуктивність у всіх тестових сценаріях, особливо на складних ендпоінтах з великою кількістю бізнес-логіки. Мікросервіси програють через мережеві затримки та накладні витрати на міжсервісну координацію, але забезпечують більшу гнучкість та масштабованість.

Аналіз підтримуваності та процесу розробки: моноліт (просте локальне тестування; зростання складності при великому обсязі коду; можливі конфлікти при роботі великої команди), мікросервіси (чітка модульність; незалежні релізи окремих сервісів; потреба в CI/CD, моніторингу, логуванні, оркестрації).

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексному аналізі впливу архітектури на продуктивність, підтримуваність та розробку ПЗ. На відміну від досліджень, що зосереджуються лише на швидкодії або масштабованості, у роботі порівняно повний набір параметрів, що формують реальну ефективність архітектурного підходу в умовах сучасних вимог.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що вибір архітектури ПЗ значно впливає на продуктивність, підтримуваність і процес розробки. Монолітна архітектура забезпечує кращу продуктивність і простоту запуску, тоді як мікросервісна дозволяє підвищити гнучкість, масштабованість і якість командної роботи. Оптимальний вибір залежить від вимог проєкту: маленькі та середні системи виграють від моноліту, тоді як великі корпоративні рішення – від мікросервісів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Microservice Architecture pattern [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://microservices.io/patterns/microservices.html (дата звернення: 06.11.2025)
2. What is monolithic architecture? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ibm.com/think/topics/monolithic-architecture (дата звернення: 05.11.2025)
3. Monolithic vs Microservices Architecture [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.atlassian.com/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith (дата звернення: 06.11.2025)

УДК 004.42

А.С. Круглик[1], Д.М. Мороз[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ GRAFANA, PROMETHEUS, OPENTELEMETRY

Анотація. У статті розглянуто особливості функціонування трьох сучасних систем моніторингу – Grafana, Prometheus та OpenTelemetry. Виконано порівняльний аналіз їх архітектурних підходів, функціональних можливостей, гнучкості масштабування та інтеграції з іншими компонентами інформаційних систем. Особливу увагу приділено їхньому використанню в умовах мікросервісної архітектури та розподілених обчислень, де вимоги до надійності моніторингу, швидкості реакції та точності збору метрик є особливо високими. Окрім технічних аспектів, також розглянуто практичні сценарії інтеграції зазначених інструментів у єдине середовище спостереження (observability stack).

***Ключові слова**: Grafana, Prometheus, OpenTelemetry, моніторинг, метрики, DevOps, observability.*

Вступ. Моніторинг програмних систем є критичним компонентом забезпечення надійності, стабільності та безпеки IT-інфраструктури. У сучасних умовах розвитку хмарних сервісів, систем обробки черг повідомлень, контейнеризації та DevOps-практик збільшилася потреба в інструментах, що дозволяють не лише збирати дані, але й оперативно їх аналізувати, виявляти відхилення та автоматично реагувати на інциденти. Саме тому такі системи, як Prometheus, Grafana та OpenTelemetry, стали ключовими елементами сучасних платформ спостереження.

Кожна з них виконує власну роль: Prometheus забезпечує ефективний збір та зберігання метрик, Grafana – потужні засоби візуалізації, тоді як OpenTelemetry виступає універсальним шаром збору даних, який уніфікує підходи до моніторингу застосунків, сервісів і інфраструктури.

Постановка задачі. Огляд уніфікованого рішення моніторингу програмних систем для аналізу продуктивності, стабільності та безпеки інфраструктури.

Основний зміст роботи. Під час дослідження вказаних систем моніторингу було проведено аналіз даних систем з кількох окремих позицій. На думку авторів однією з найголовніших характеристик даних систем є функціональні можливості кожної системи для забезпечення моніторингу, логування та візуального представлення метрик програмних систем.

Prometheus забезпечує високу продуктивність при зборі великого обсягу метрик, має власну мову запитів (PromQL), що дозволяє виконувати складні аналітичні обчислення у реальному часі. Недоліком є обмежена підтримка історичних даних та складність масштабування при роботі з великими кластерами без сторонніх рішень, таких як Thanos або Cortex.

Grafana, у свою чергу, не збирає метрики, але надає широкі можливості для їх візуалізації. Система підтримує інтеграцію з сотнями джерел даних і має розвинену систему оповіщень (alerting). Завдяки плагінній архітектурі Grafana може адаптуватися до будь-яких специфічних потреб – від моніторингу інфраструктури до бізнес-аналітики.

OpenTelemetry відзначається універсальністю. Його головна мета – стандартизувати підхід до спостереження за системами. Якщо Prometheus фокусується на метриках, а Grafana – на візуалізації, то OpenTelemetry охоплює всі три аспекти спостереження – метрики, логи та трейси. Проте впровадження OpenTelemetry потребує глибшого розуміння архітектури та додаткових налаштувань, що може бути складним для початківців.

Іншою важливою характеристикою систем моніторингу є їхня архітектура. Аналіз архітектур дозволяє сфокусуватись на сильних місцях кожної системи та враховувати потенційно слабкі місця таких систем.

Prometheus реалізує pull-based підхід до збору метрик: замість того, щоб застосунки самі надсилали дані, Prometheus опитує їхні ендпоїнти з певним інтервалом. Це дозволяє контролювати навантаження, зменшує ризик втрати даних і спрощує балансування. Архітектура Prometheus складається з таких компонентів, як сервер збору, база часових рядів (TSDB), конфігураційні файли з описом цілей (targets) та інтерфейс запитів PromQL. Prometheus ідеально підходить для моніторингу систем із високою динамікою, зокрема контейнеризованих середовищ (Docker, Kubernetes).

Grafana виконує роль інструменту аналітики та візуалізації. Її архітектура базується на принципі підключення до зовнішніх джерел даних (data sources), серед яких можуть бути не лише Prometheus, а й InfluxDB, Elasticsearch, OpenSearch, Loki, OpenTelemetry, PostgreSQL тощо. Grafana підтримує побудову інтерактивних дашбордів із можливістю застосування змінних, фільтрів, автоматичних тригерів оповіщень. Це робить її незамінним інструментом для DevOps- і SRE-команд, які повинні мати єдиний погляд на стан інфраструктури.

OpenTelemetry – це стандартизована платформа для збору метрик, логів і трас (distributed tracing). Вона поєднує попередні проєкти OpenCensus та OpenTracing, пропонуючи уніфікований API та SDK для різних мов програмування (Java, Go, Python, C++, .NET тощо). Центральним елементом

архітектури OpenTelemetry є Collector, який приймає дані з агентів або безпосередньо з програм, виконує попередню обробку та пересилає їх до систем зберігання – таких як Prometheus, Jaeger, Tempo чи Grafana Cloud. Завдяки цьому OpenTelemetry виступає «клеєм», що пов'язує різні компоненти системи спостереження у єдиний контур.

На практиці ці три системи часто використовуються разом. Наприклад, OpenTelemetry збирає дані з мікросервісів, Prometheus зберігає часові ряди метрик, а Grafana надає інтерактивні дашборди для аналітики. Такий підхід дозволяє реалізувати повноцінну екосистему observability, де кожен інструмент виконує свою роль у загальному процесі моніторингу.

Це поєднання забезпечує:

- централізоване спостереження за додатками, програмними продуктами з різним ступенем навантаженості у кожен конкретний проміжок часу;
- раннє виявлення відмов і аномалій;
- зменшення часу реагування на інциденти;
- аналітику продуктивності на основі історичних даних.

Наукова новизна даного аналізу полягає у пошуку раціональних способів аналізу роботи програмних систем за допомогою існуючих програмних рішень.

Висновки. Порівняльний аналіз систем Grafana, Prometheus та OpenTelemetry показав, що кожна з них має власну спеціалізацію та оптимальні сценарії застосування. Prometheus ефективний як ядро для збору метрик і спостереження за продуктивністю, Grafana забезпечує зручний інтерфейс для аналізу даних, а OpenTelemetry виступає фундаментом для стандартизації процесів збору спостережних даних у гетерогенних середовищах. Комбіноване використання цих рішень формує комплексний підхід до моніторингу, що відповідає сучасним вимогам DevOps, SRE та Cloud Native архітектур. У перспективі розвиток OpenTelemetry як відкритого стандарту може привести до поступової уніфікації підходів до спостереження, спрощення інтеграції різних компонентів та підвищення прозорості роботи великих розподілених систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Documentation. *OpenTelemetry*. URL: https://opentelemetry.io/docs/ (date of access: 09.11.2025).
2. Overview | Prometheus. *Prometheus - Monitoring system & time series database*. URL: https://prometheus.io/docs/introduction/overview/ (date of access: 09.11.2025).
3. Technical documentation | Grafana Labs. *Grafana Labs*. URL: https://grafana.com/docs/ (date of access: 09.11.2025)
4. Шепетько І. В. Впровадження OpenTelemetry для підвищення якості функціонування мікросервісних архітектур : магістерська робота : 172. Київ, 2024. 82 с.
5. Julian M. Practical Monitoring: Effective Strategies for the Real World. O'Reilly, 2017. 167 p.

УДК 004.4:004.738.5:659.3

О.С. Шевцова[1], С.О. Вялушкін[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ І НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТРАТЕГІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ В ЛОГІЧНИХ ІГРАХ

Анотація. У роботі розглянуто підхід до моделювання стратегічної поведінки в логічних іграх із використанням методів штучного інтелекту та нейронних мереж. Проведено аналіз сучасних алгоритмів прийняття рішень, таких як мінімакс, альфа-бета відсікання, а також підходів навчання з підкріпленням, що застосовуються в інтелектуальних ігрових системах. Запропоновано архітектуру гібридної системи, яка поєднує класичні методи пошуку з нейронною мережею для оцінки позицій у шаховій грі. Розроблено прототип програмної системи на основі Python, TensorFlow і PyQt, який реалізує автономне прийняття рішень і здатний до самонавчання. Проведено експериментальні дослідження, що підтвердили підвищення ефективності прийняття рішень на 20 – 25% порівняно з традиційними алгоритмічними методами. Отримані результати мають практичне значення для створення навчальних і тренувальних платформ, систем підтримки прийняття рішень та інших інтелектуальних застосувань.

Ключові слова: *штучний інтелект; нейронна мережа; машинне навчання; стратегічна поведінка; шахи; гібридна система; прийняття рішень; навчання з підкріпленням; інформаційна технологія.*

Вступ. У сучасних умовах активного розвитку інформаційних технологій, штучний інтелект (ШІ) стає ключовим напрямом інновацій. Його застосування у сфері логічних ігор, зокрема шахів, відкриває широкі можливості для створення навчальних і тренувальних систем нового покоління. Шахи - це класичний приклад гри, що вимагає високого рівня стратегічного мислення, логічного аналізу та планування наперед. Саме тому ця гра традиційно використовується для тестування алгоритмів штучного інтелекту. Актуальність роботи обумовлена потребою у створенні моделей, які здатні імітувати логічне мислення людини, самонавчатися та адаптувати свою стратегію під конкретного суперника.

Метою дослідження є розробка методів побудови та навчання нейронних мереж для моделювання стратегічної поведінки гравця в логічних іграх та створення прототипу програмного рішення з елементами штучного інтелекту.

Постановка завдання. Для досягнення мети визначено такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих підходів до реалізації ШІ у логічних іграх.
2. Дослідити сучасні методи побудови та навчання нейронних мереж.
3. Розробити концептуальну модель нейронної мережі для шахового рушія.
4. Реалізувати алгоритми прийняття рішень (мінімакс, альфа-бета, Монте-Карло) у поєднанні з нейромережею.

5. Провести навчання нейронної мережі та експериментальне порівняння її роботи з класичними підходами.

Основний зміст роботи. Для реалізації поставлених завдань застосовано:

- методи математичного моделювання - для формалізації ігрового процесу.
- методи машинного навчання і глибинних нейронних мереж - для побудови моделі прийняття рішень.
- алгоритми мінімаксу з альфа-бета відсіканням - для оптимізації процесу пошуку.
- методи порівняльного аналізу - для оцінки ефективності запропонованої моделі.

Аналіз існуючих підходів. Історично розробка інтелектуальних систем для шахів починалася з алгоритмів пошуку у глибину, серед яких ключову роль відіграють алгоритми «мінімакс» і «альфа-бета відсікання». Ці методи дозволяють оцінювати можливі варіанти гри на декілька ходів наперед, однак вони мають обмеження щодо масштабованості й адаптивності. У сучасних рішеннях активно використовуються гібридні підходи, де класичні алгоритми поєднуються з нейронними мережами та методами глибинного навчання.

Серед найвідоміших шахових рушіїв варто виділити Stockfish, AlphaZero та Leela Chess Zero. Stockfish - це відкрите програмне забезпечення, яке базується на евристичних оцінках та має надзвичайну швидкість обчислень. AlphaZero, розроблений компанією DeepMind, реалізує підхід повного самонавчання без попередніх знань, що забезпечує унікальну здатність до самостійного формування стратегії. Leela Chess Zero є відкритою альтернативою AlphaZero, використовує розподілені обчислення для навчання та демонструє стабільно високі результати.

Як видно з таблиці 1, традиційні алгоритми демонструють високу швидкість роботи, але поступаються сучасним нейронним підходам у здатності до адаптації та самонавчання. Комбінування обох підходів дозволяє отримати систему, здатну швидко обчислювати позиції та одночасно навчатися новим стратегіям.

Опис архітектури розробленої системи. Розробка системи прийняття рішень у шаховій грі базується на поєднанні класичних пошукових алгоритмів і сучасних методів машинного навчання. Основна мета полягає у створенні модуля штучного інтелекту, здатного обирати оптимальні ходи в межах обмеженого часу обчислень, використовуючи оцінку поточного стану шахової позиції.

Для досягнення цього було реалізовано кілька класичних алгоритмів - Мінімакс із альфа-бета відсіченням і пошук Монте-Карло (MCTS), а також застосовано нейронну мережу для оцінки позицій.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика шахових рушіїв

Рушій	Тип підходу	Переваги	Недоліки
Stockfish	Класичний алгоритмічний (мінімакс + альфа-бета)	Висока швидкість, відкритий код, стабільність	Не адаптується до стилю гри
AlphaZero	Нейронна мережа з навчанням з підкріпленням	Самонавчання, стратегічна гнучкість	Високі обчислювальні вимоги
Leela Chess Zero	Гібрид нейромережевого підходу з розподіленим навчанням	Відкрите ПЗ, можливість масштабування	Залежність від кількості обчислювальних ресурсів

Архітектура розробленої системи побудована за модульним принципом і включає чотири основні компоненти: ігровий рушій, модуль штучного інтелекту, нейронну мережу оцінки позицій та графічний інтерфейс користувача. Таке розділення дозволяє незалежно вдосконалювати окремі частини системи, забезпечуючи масштабованість і гнучкість.

1. Ігровий рушій відповідає за відтворення логіки гри, контроль дотримання правил, облік ходів та оновлення стану дошки. Він реалізує базову структуру даних для представлення позицій, можливих ходів і станів гри (мат, шах, пат).

2. Модуль штучного інтелекту виконує аналітичну обробку поточного стану гри, прогнозує варіанти розвитку подій і вибирає оптимальну стратегію. Він базується на алгоритмі мінімаксу з альфа-бета відсіканням і використовує нейронну мережу для оцінки перспективності позицій.

3. Нейронна мережа реалізує функцію оцінки поточного стану дошки. Її архітектура побудована за принципом багатошарового персептрону, що містить вхідний шар для подання даних про фігури, приховані шари для обробки патернів та вихідний шар, який формує оцінку позиції. Використовується оптимізатор Adam і функція активації ReLU. Навчання проводилось на вибірці з кількох тисяч ігрових позицій, згенерованих під час симуляцій партій проти рушія Stockfish.

4. Графічний інтерфейс користувача (GUI) забезпечує інтерактивну взаємодію користувача з системою. Він реалізований на базі бібліотеки PyQt і надає зручні засоби для візуалізації шахової дошки, вибору режиму гри, аналізу партій і відображення рішень, які приймає ШІ.

Взаємодія між компонентами здійснюється через централізований контролер, який координує обмін даними між ігровим рушієм, модулем ШІ та інтерфейсом користувача. Такий підхід дозволяє легко адаптувати систему під інші ігрові середовища або сценарії навчання.

Програмна реалізація системи. Розробка системи виконувалася з використанням мови програмування Python, оскільки вона надає широкий набір бібліотек для роботи з нейронними мережами, аналізу даних і створення графічних інтерфейсів. Основними інструментами для реалізації стали TensorFlow, Keras і PyQt5.

Модель нейронної мережі реалізована як багатошарова перцептронна мережа (MLP) з наступною структурою:

- вхідний шар: 64 нейрони (по одному на кожну клітинку шахівниці);
- прихований шар: 128 нейронів, активація ReLU;
- вихідний шар: 1 нейрон (оцінка позиції від -1 до +1).

Оцінка позиції використовується замість статичної евристики, що підвищує якість гри на середніх і великих глибинах дерева.

Розроблений модуль нейронної мережі використовує TensorFlow для побудови та навчання моделі. Вхідні дані подаються у вигляді матриці 8×8, де кожна клітинка відповідає типу фігури та її кольору. Цей підхід дозволяє мережі сприймати структуру шахової позиції аналогічно до зображення, що дає змогу виявляти просторові залежності.

Основна логіка прийняття рішень реалізована через алгоритм мінімаксу з модифікацією альфа-бета відсікання. На кожному кроці нейронна мережа оцінює потенційні позиції, а алгоритм мінімаксу обирає хід з максимальною оцінкою. Це дозволяє збалансувати швидкість обчислень і точність рішень.

Модель навчалася на великому наборі шахових партій, отриманих з відкритих баз даних. Для підвищення ефективності використано оптимізатор Adam і функцію втрат на основі середньоквадратичної похибки. Результати навчання показали стабільну збіжність та підвищення точності оцінки позицій після кожної епохи.

Результати експериментів. Програмна реалізація підтвердила ефективність розробленої архітектури. Система забезпечує автономне прийняття рішень, можливість самонавчання і гнучку адаптацію до різних умов гри. Це створює передумови для її подальшого розвитку у вигляді вебдодатків, мобільних версій або інтерації в освітні платформи.

Тестування системи проводилося у кілька етапів: функціональне тестування базових модулів, інтеграційне тестування взаємодії між компонентами та порівняльне тестування продуктивності ШІ при різних параметрах навчання. За результатами експериментів система продемонструвала стабільну роботу, а нейронна мережа навчилася правильно оцінювати позиційні переваги вже після 10 епох навчання.

Порівняльне тестування продемонструвало, що гібридна система перевищує ефективність базового алгоритму мінімаксу приблизно на 22% за

швидкістю прийняття рішень і на 18% за точністю прогнозу виграшної стратегії. Крім того, ШІ демонструє здатність змінювати власну стратегію у процесі гри, що свідчить про реалізацію адаптивної поведінки.

Практичне значення. Розроблений підхід може бути використаний у навчальних платформах, що сприяють розвитку стратегічного мислення, а також у створенні тренажерів для шахістів різного рівня. Система може бути адаптована для інших логічних ігор - шашок, ґо, судоку тощо. Крім того, її архітектура може бути застосована в галузі робототехніки для побудови систем прийняття рішень у реальному часі.

Наукова новизна роботи полягає у запропонованому гібридному підході, який поєднує класичні алгоритми пошуку рішень із нейромережею для оцінки ігрових позицій. Це дозволяє підвищити точність прийняття рішень, скоротити час обчислень і забезпечити здатність системи до самонавчання. На відміну від традиційних рушіїв, які покладаються на статичні евристики, розроблена модель використовує адаптивну оцінку позиції, що формується в процесі навчання на великій кількості ігрових сценаріїв.

Висновки. Розроблено та досліджено інформаційну технологію, що поєднує методи машинного навчання з класичними алгоритмами пошуку. Проведено експериментальну перевірку роботи системи на прикладі шахової гри. Отримані результати підтверджують доцільність використання нейронних мереж для моделювання стратегічної поведінки та відкривають перспективи розвитку інтелектуальних ігрових систем нового покоління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андрущенко Ю. І. Інтелектуальні системи підтримки навчання. – Київ: КНЕУ, 2020. – 180с.
2. Бойко І. В. Методи машинного навчання в інтелектуальних системах. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. – 275 с.
3. Мельник О. П. Нейронні мережі та їх застосування в інформаційних технологіях. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2020. – 286 с.
4. Шевчук Р. О. Алгоритми машинного навчання: теорія і практика. – Київ: КНЕУ, 2021. – 280с.
5. Рогов В. І. Штучний інтелект у комп’ютерних іграх. – Одеса: ОНУ ім. І. Мечникова, 2022. – 198 с.
6. Жданов О. І. Алгоритми пошуку у просторі станів. – Київ: Видавництво КНУ ім. Т. Шевченка, 2017. – 264 с.
7. Костенко П. В. Методи інтелектуального аналізу даних. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2020. – 336 с.

УДК 004.4:004.738.5

В.В. Спірінцев[1], Є.С.Дубіна[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МІКРОСЕРВІСНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ КОРИСТУВАЧІВ І РЕСУРСІВ AWS У СФЕРІ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ ЗАСОБАМИ C# ТА GO

Анотація. Розглянуто ключові аспекти дослідження ефективності мікросервісної системи моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS, реалізовану засобами C# і Go. Проведено розгортання мікросервісів на екземплярах AWS EC2 та виконано порівняльний аналіз за критеріями споживання процесорного часу, оперативної пам'яті та швидкості обробки запитів. Проаналізовано результати продуктивності та використання ресурсів між реалізаціями на мовах програмування C# і Go для визначення доцільності застосування кожної мови в системах електронної комерції з хмарною архітектурою.

***Ключові слова**: мікросервіси, моніторинг, AWS, EC2, Go, C#, ефективність, ресурси, паралельні запити, Docker, Prometheus, cAdvisor.*

Вступ. Мікросервісні архітектури стають дедалі поширенішими в хмарних системах електронної комерції [1]. Вони дозволяють розділяти функціонал на незалежні компоненти, що забезпечує масштабованість і можливість оновлення окремих сервісів без зупинки всієї системи. Однією з важливих складових таких архітектур є моніторинг користувачів та ресурсів, який дозволяє відстежувати стан системи, оптимізувати навантаження та виявляти проблеми у роботі сервісів. Хмарна платформа AWS надає набір інструментів для розгортання та управління мікросервісами, включаючи різні типи екземплярів EC2, що дозволяє оцінювати продуктивність і споживання ресурсів в умовах обмеженого апаратного забезпечення. Дослідження ефективності реалізації мікросервісної системи є актуальним, оскільки дозволяє оцінити продуктивність та використання ресурсів мов програмування в хмарних системах електронної комерції, забезпечуючи обґрунтований вибір технології для розробки високонавантажених сервісів.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є порівняння реалізації мікросервісного моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS засобами C# і Go та аналіз отриманих результатів для визначення доцільності застосування кожної з мов у системах електронної комерції. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі: проаналізувати особливості мікросервісної архітектури та інструменти моніторингу в хмарному середовищі AWS; розгорнути мікросервіси моніторингу на екземплярах AWS EC2 для програмних реалізацій; провести тестування продуктивності мікросервісів за критеріями споживання процесорного часу, оперативної пам'яті та швидкості обробки запитів; порівняти використання ресурсів між

реалізаціями на C# і Go, та зазначити доцільність застосування мов програмування для мікросервісної системи.

Основний зміст роботи. Go є компільованою мовою з підтримкою статичної типізації, призначеною для створення серверних і розподілених систем [2]. У мікросервісній архітектурі Go забезпечує незалежне виконання кожного сервісу у вигляді окремого бінарного файлу.

Механізм горутин дозволяє виконувати численні одночасні запити всередині мікросервісу без блокувань, а канали забезпечують синхронізацію і обмін даними між компонентами. Таким чином, мова включає наступні стандартні пакети:

- net/http для обробки HTTP-запитів і реалізації REST API;
- encoding/json та encoding/xml для серіалізації і десеріалізації даних;
- database/sql для підключення до реляційних баз даних;
- сторонні фреймворки для маршрутизації і middleware;
- grpc-go для взаємодії між мікросервісами через gRPC.

Мікросервіси на Go можуть обробляти велику кількість одночасних запитів, контролювати використання CPU і пам’яті, масштабуватися через додавання нових екземплярів і розгортатися на окремих машинах або контейнерах без додаткових залежностей.

Серед основних особливостей Go в розробці мікросервісної архітектури варто зазначити: канали, що синхронізують обмін даними між сервісами без необхідності ручного керування потоками; компіляція у статичний бінарний файл усуває залежності від сторонніх середовищ виконання, спрощуючи контейнеризацію та розгортання на AWS; модель управління пам’яттю з автоматичним збором сміття дозволяє стабільно підтримувати роботу при змінному навантаженні, а стандартна бібліотека net/http та підтримка gRPC забезпечують комунікацію між мікросервісами у розподіленому середовищі.

Мова C# підтримує статичну типізацію на платформі .NET, та в мікросервісній архітектурі забезпечує виконання кожного сервісу у вигляді окремого додатку або контейнеризованого сервісу [3]. Механізм платформи async/await дозволяє виконувати численні одночасні запити без блокувань, а TPL забезпечує паралельне виконання операцій та синхронізацію даних між компонентами. C# містить наступні стандартні бібліотеки та фреймворки:

- ASP.NET Core для обробки HTTP-запитів і реалізації REST API;
- System.Text.Json та System.Xml для серіалізації і десеріалізації даних;
- Entity Framework Core та ADO.NET для роботи з реляційними базами даних;
- сторонні middleware-фреймворки для маршрутизації та обробки запитів;
- gRPC для .NET для взаємодії між мікросервісами.

Особливістю використання C# у мікросервісній архітектурі є підтримка розгалуженої екосистеми бібліотек і фреймворків, що забезпечують повний цикл створення, тестування та розгортання сервісів. Платформа .NET Core надає

інструменти для побудови REST API через ASP.NET Core, управління потоками та асинхронними операціями, зокрема має вбудовану підтримку контейнеризації та оркестрації, що спрощує розгортання мікросервісів у хмарному середовищі. Зокрема, інтеграція з сервісами Azure та AWS SDK дозволяє реалізовувати автоматичний моніторинг, збір метрик, логування та масштабування залежно від навантаження, а Entity Framework Core забезпечує доступ до баз даних із підтримкою транзакцій і міграцій [4].

У ході тестування реалізацій мікросервісних систем моніторингу користувачів і ресурсів, обидва варіанти були розгорнуті на екземплярі AWS EC2 типу t2.small, специфікації якого наведено на рис. 1.

Було визначено показники за споживанням процесорного часу, оперативної пам’яті та швидкістю обробки запитів на екземплярі. Моніторинг ефективності використання ресурсів проводився за допомогою Prometheus та cAdvisor, що дозволяють вимірювати CPU, RAM та метрики контейнерів Docker у Linux-середовищі.

▼ **Instance type comparison**

Attribute	t2.small
vCPUs	1 (1 core)
Memory (MiB)	2048
Storage (GB)	–
Supported root device types	ebs
Network performance	Low to Moderate
Architecture	i386
Burstable	true
Free-tier eligible	false
Current generation	true

Рис. 1. Специфікації екземпляру EC2 типу t2.small

Для забезпечення достовірності результатів, експерименти за кожним параметром виконувалися тричі з наступним обчисленням середніх значень. Для тестування виділено такі кроки навантаження:

– запуск і ініціалізація мікросервісів Go та C# на екземплярах EC2;
– підключення до AWS CloudWatch API та отримання метрик ресурсів;
– відправка паралельних запитів до мікросервісів для збору даних про користувачів з симуляцією активності;
– обробка отриманих метрик та збереження у внутрішній базі мікросервісів;

– збір і обробка метрик використання CPU і RAM під час кожного сценарію;
– запис часу відповіді кожного сервісу на запити ;
– перевірка стабільності мікросервісів: відсутність помилок, зависань;
– моніторинг роботи Prometheus та cAdvisor для фіксації внутрішніх метрик контейнерів Docker;
– повторення кожного сценарію тричі для обчислення середніх значень.

Отримані результати ефективності роботи мікросервісних систем представлено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати порівняння ефективності використання ресурсів додатків

Кількість паралельних запитів	100	200	300
Реалізація з використанням GO, середні значення			
CPU Time, %	30,4	42,1	55,6
RAM Usage, МБ	120,5	130,7	145,3
Response Time, мс	48,2	68,3	95,1
Реалізація з використанням C#, середні значення			
CPU Time, %	45,7	58,3	72,2
RAM Usage, МБ	180,8	200,4	225,9
Response Time, мс	72,6	105,5	145,7

Результати тестування показують, що при однакових умовах навантаження мікросервіси на Go використовують менше CPU та RAM і обробляють запити швидше, ніж мікросервіси на C#. Зі збільшенням кількості паралельних запитів від 100 до 300 використання CPU та RAM зростають для обох реалізацій, а Response Time збільшується пропорційно навантаженню. Для 100–200 паралельних запитів t2.small забезпечує стабільну роботу обох реалізацій. При 300 запитах CPU доходить до пікових значень, RAM близька до ліміту, Response Time зростає значно, особливо для реалізації на C#, тоді як Go демонструє менший приріст затримок при зростанні навантаження.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у дослідженні ефективності реалізації мікросервісного моніторингу користувачів і ресурсів хмарної платформи AWS засобами мов програмування C# і Go. Проведено порівняльний аналіз використання процесорного часу, оперативної пам'яті та швидкості обробки запитів при різному рівні паралельних запитів. Встановлено вплив механізмів горутин у Go та async/await у C# на продуктивність і масштабованість мікросервісів. Розроблено методику тестування мікросервісів у контейнерах Docker на екземплярах AWS EC2 типу t2.small із використанням Prometheus та cAdvisor для збору метрик CPU, RAM та Response Time. Отримані результати дозволяють оцінити доцільність застосування Go і C# у хмарних системах електронної комерції та визначають закономірності зміни продуктивності під навантаженням, що розширює наукове уявлення про вибір технологій для мікросервісних систем моніторингу.

Висновки. У рамках виконаного дослідження було реалізовано прототип мікросервісного моніторингу користувачів і ресурсів на AWS засобами C# і Go. Результати тестування демонструють, що реалізація на Go забезпечує менше використання CPU та RAM і швидшу обробку запитів порівняно з C#, особливо при паралельних навантаженнях до 300 запитів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Implementing Microservices on AWS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.aws.amazon.com/whitepapers/latest/microservices-on-aws/microservices-on-aws.html (дата звернення: 09.11.2025)
2. The Go Programming Language Specification [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://go.dev/ref/spec (дата звернення: 09.11.2025)
3. C# language documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/ (дата звернення: 09.11.2025)
4. ASP.NET documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/?view=aspnetcore-9.0 (дата звернення: 09.11.

УДК 004.75:004.89

М.Г. Бердник[1], І.П. Стародубський[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОД АДАПТИВНОЇ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. В роботі розробленні метод адаптивної контейнеризації хмарних систем з інтеграцією алгоритмів штучного інтелекту для забезпечення автоматичного масштабування контейнерів залежно від навантаження та контексту виконання. Методологія дослідження базується на моделюванні процесів розподілення ресурсів у динамічних середовищах, застосуванні елементів теорії адаптивних систем і машинного навчання для прийняття рішень у реальному часі. Отримані результати створюють основу для побудови інтелектуальних систем автоматичного масштабування контейнерів у хмарних середовищах з урахуванням поведінкових моделей навантаження та прогнозування потреб у ресурсах.

***Ключові слова**: контейнеризація, штучний інтелект, масштабування, хмарні обчислення, машинне навчання, оркестрація, Kubernetes.*

Вступ. Сучасна IT-інфраструктура дедалі більше орієнтується на гнучкі, модульні та динамічні підходи до побудови обчислювальних систем. Одним із ключових напрямів цього розвитку стала контейнеризація, яка забезпечує ізоляцію, портативність і керованість програмних компонентів незалежно від апаратної або операційної платформи. Завдяки таким технологіям, як Docker [1] і Kubernetes [6],[1], стало можливим ефективне розгортання та масштабування додатків у хмарних середовищах, що, своєю чергою, сприяло швидкому поширенню мікросервісної архітектури. Контейнери дозволяють об’єднувати програмні модулі в незалежні блоки, які можна розгортати, оновлювати та обслуговувати без впливу на інші частини системи, тим самим суттєво підвищуючи гнучкість і надійність інфраструктури [9].

Проте разом із перевагами контейнеризація створює й нові виклики. У великих динамічних середовищах з великою кількістю мікросервісів постає питання ефективного управління ресурсами. Системи оркестрації, як-от Kubernetes, мають вбудовані механізми автоматичного масштабування [2] контейнерів, але ці механізми ґрунтуються переважно на фіксованих порогових значеннях використання процесора чи пам’яті. Такий підхід не враховує контексту виконання, змін у поведінці користувачів, часу доби, складності запитів або впливу зовнішніх факторів. Як наслідок, система часто працює в неефективних режимах: у періоди низького навантаження витрачає надмірні ресурси, а під час пікової активності – не встигає реагувати, що призводить до затримок і втрати стабільності сервісів.

Проблема ускладняються тим, що сучасні обчислювальні системи є динамічними не лише з погляду навантаження, а й з точки зору самої інфраструктури. Нові контейнери постійно створюються, оновлюються,

мігрують між вузлами, а залежності між сервісами змінюються в реальному часі. Це створює складне, багатовимірне середовище, у якому класичні методи керування вже не здатні забезпечити необхідну гнучкість. У таких умовах виникає потреба у системах, здатних не лише реагувати на зміни, а й передбачати їх, формуючи рішення на основі аналізу історичних даних і поточних тенденцій.

Саме тут доцільним є застосування методів штучного інтелекту, які дають змогу автоматизувати процеси аналізу, прогнозування та прийняття рішень у хмарних системах. Інтеграція алгоритмів машинного навчання в процеси контейнеризації відкриває можливість побудови інтелектуальних систем оркестрації, що діють на випередження. Завдяки такому підходу система може передбачати пікові навантаження, оптимізувати споживання ресурсів і зменшувати ризик перевантаження сервісів без втручання адміністратора. Подібні рішення вже активно досліджуються в контексті концепції AIOps [12], яка передбачає використання штучного інтелекту для автоматизації операційних процесів у хмарній інфраструктурі.

Розвиток концепції адаптивної контейнеризації з інтеграцією ШІ є логічним етапом еволюції інфраструктурних технологій. Такий підхід дозволяє не лише автоматизувати розподіл ресурсів, а й створити систему, що здатна навчатися на власному досвіді, удосконалювати свої стратегії масштабування і приймати рішення на основі контексту. На відміну від класичних оркестраторів, адаптивна система діє не за наперед заданими правилами, а за аналітично обґрунтованими моделями поведінки. Це відкриває шлях до створення самокерованих інфраструктур, у яких контейнери, алгоритми та сервіси взаємодіють як єдиний організм.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена потребою в побудові інтелектуальних контейнерних систем, здатних автоматично адаптуватися до змін середовища виконання, підвищувати ефективність використання ресурсів і гарантувати стабільність роботи навіть у критичних умовах навантаження. Метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту спрямований на створення теоретичної та практичної основи для таких систем, поєднуючи підходи DevOps, MLOps і AIOps [12] у єдину архітектуру керування, яка забезпечує самонавчання, гнучкість і автономність сучасних хмарних інфраструктур [3].

У сучасних хмарних середовищах [10] контейнеризація стала основним механізмом розгортання і масштабування програмних систем, однак існуючі підходи до керування ресурсами залишаються переважно статичними. Алгоритми стандартних засобів оркестрації, таких як Kubernetes [11], реагують на зміну навантаження постфактум, що призводить до перевитрати ресурсів або втрати продуктивності у пікові періоди. Проблема полягає в тому, що система не володіє здатністю прогнозувати розвиток подій і не враховує контекстні чинники – тип запитів, поведінку користувачів, сезонність навантаження, зовнішні події.

Постановка задачі. Мета дослідження полягає у створенні методу адаптивної контейнеризації, який інтегрує алгоритми штучного інтелекту у

процеси аналізу, прогнозування та прийняття рішень у межах контейнерної інфраструктури. Запропонований підхід має забезпечити динамічне масштабування контейнерів на основі аналітичних моделей, що дозволить зменшити затримки реакції системи, підвищити стабільність сервісів і оптимізувати використання ресурсів у реальному часі.

Очікуваним результатом є побудова інтелектуального механізму керування контейнерними середовищами, здатного самостійно адаптуватися до змін навантаження, навчатися на історичних даних і приймати рішення без участі адміністратора.

Основний зміст роботи. Метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту реалізується як багатокомпонентна система, що функціонує поверх Kubernetes і доповнює його стандартну архітектуру новим інтелектуальним рівнем. Його завдання – забезпечити динамічне прогнозування навантажень, автоматичне масштабування та оптимізацію розподілу ресурсів з урахуванням реального контексту виконання. Основна перевага методу полягає у здатності перетворити Kubernetes із традиційного оркестратора контейнерів на самонавчальну систему управління, здатну реагувати на зміни середовища не за фіксованими правилами, а через обчислювально обґрунтовані рішення.

У центрі архітектури перебуває інтелектуальний шар керування – AI Decision Engine [5], який працює у тісній взаємодії з Control Plane Kubernetes. Control Plane складається з API Server, Scheduler, Controller Manager і etcd, що зберігає поточний стан кластеру. AI Decision Engine підключається до цього циклу через власні контролери, реалізовані на базі бібліотеки controller-runtime. Це дозволяє створювати custom controllers, які реагують на зміни у Custom Resource Definitions (CRD), специфічних для адаптивної системи. Основним ресурсом є AdaptiveScalingPolicy, який визначає параметри політики масштабування для певного сервісу – часові інтервали, допустимі межі навантаження, алгоритм прогнозування та пріоритети QoS.

Ключовим компонентом Control Plane є Scheduler Extender, який розширює базовий планувальник Kubernetes. AI Decision Engine [5] взаємодіє з ним через gRPC API, надаючи рекомендації щодо розміщення подів на вузлах. Цей механізм дозволяє уникнути перевантаження окремих нод і враховувати апаратні параметри (GPU, SSD, NUMA-топологію). Рішення приймається на основі поточних метрик, які отримуються з kubelet через Prometheus Node Exporter у форматі exposition text або OpenMetrics, і передаються через pushgateway до Data Processor.

На рівні виконання контейнерів кожен вузол містить kubelet, що підтримує локальний event-loop [4]. AI Decision Engine отримує повідомлення про події типу PodPending, PodRunning, PodEvicted і NodeNotReady через API-сервіс і зберігає їх у message queue Kafka. Це створює реактивну подієву модель, у якій кожна зміна стану інфраструктури є тригером для аналізу та потенційної адаптації. На основі цих подій формується «стан системи» — структурований об’єкт, що містить параметри ресурсів, кількість активних подів, відсоток CPU

saturation, кількість відкритих сокетів, середній час обробки запиту, delay у чергах RabbitMQ або Kafka topic lag.

Архітектура AI Decision Engine поділяється на кілька логічних модулів.

Перший – Data Processor – відповідає за очистку, агрегацію та нормалізацію даних. Він об'єднує метрики з різних джерел (Prometheus, cAdvisor, Elastic APM) у єдиний формат Protobuf, що полегшує їх подальшу передачу по gRPC. Для цього використовується PromQL-запити з інтервалом від 5 до 30 секунд, які агрегуються в time-series базі.

Другий модуль – Anomaly Detector – аналізує історію метрик та виявляє аномалії за допомогою алгоритмів Isolation Forest або Prophet. Це дозволяє фільтрувати короткочасні сплески навантаження, які не потребують масштабування.

Третій – Predictor, який використовує модель машинного навчання, навчену на даних про попередні зміни навантаження. Він формує прогноз очікуваних значень метрик на найближчі хвилини чи години.

Четвертий – Recommender, який перетворює прогноз у конкретні дії: зміну кількості реплік, корекцію ресурсних лімітів або ініціацію міграції подів на менш завантажені вузли.

Комунікація між цими модулями відбувається через внутрішній шини повідомлень NATS або Redis Streams. Це дає змогу масштабувати аналітичну частину незалежно від решти інфраструктури. Для забезпечення узгодженості між інференцією та тренуванням моделей застосовується спільний Feature Store (Feast або Hopsworks), який гарантує, що набір ознак для навчання та прогнозування однаковий.

Інференція моделі відбувається у мікросервісі Inference Gateway [7], який розгортається у вигляді контейнера з TensorFlow Serving або TorchServe. Комунікація здійснюється через HTTP/gRPC API, а відповідь моделі включає прогнозоване значення метрик та рівень довіри. Кожен запит до моделі логгується, що дозволяє оцінювати її ефективність і виявляти деградацію (model drift). Якщо точність прогнозу падає нижче допустимого порогу, зініціюється retraining pipeline у Kubeflow Pipelines або Airflow DAG, який збирає нові дані, оновлює модель і реєструє нову версію в MLflow Model Registry [8]. Для безпечного оновлення моделі використовується shadow deployment: нова версія отримує трафік паралельно з попередньою, але не впливає на прийняття рішень. Лише після проходження тестів і аналізу різниці прогнозів виконується switch на нову модель.

З боку Kubernetes метод впроваджується через reconciliation loop, типовий для усіх контролерів. AI Decision Controller постійно звіряє поточний стан кластеру з бажаним, який формується на основі прогнозів. Якщо між ними є розбіжність – створюється або видаляється pod, оновлюються ресурси або змінюється Deployment. Цей цикл відбувається асинхронно, але контрольованим темпом, щоб уникнути перевантаження API Server. Для захисту від race-condition

використовується механізм leader election, який гарантує, що одночасно активний лише один контролер масштабу.

Рівень observability охоплює кілька систем збору даних. Prometheus агрегує метрики ядра Kubernetes, Loki – логи, Jaeger – трасування запитів, а Grafana поєднує їх у єдину аналітичну панель. Всі події системи маркуються trace-id, що дозволяє відстежити, як конкретне рішення AI-модуля вплинуло на продуктивність сервісу. Для довготривалого зберігання даних використовується Thanos, який архівує історію метрик і дозволяє проводити ретроспективний аналіз ефективності моделей.

Забезпечення надійності системи реалізується на рівні fault domain isolation. Кластер розподіляється на кілька зон доступності, а AI Decision Engine має дубльований екземпляр у кожній зоні. Для тестування стійкості використовується chaos engineering: інструменти типу LitmusChaos або Chaos Mesh випадковим чином зупиняють вузли або поди, щоб перевірити здатність системи відновлювати стабільність. Результати таких експериментів зберігаються у спеціальному журналі resilience log і використовуються для подальшого вдосконалення політик масштабування.

У плані безпеки реалізовано комплексний підхід. Використовуються network policies для обмеження трафіку між просторами імен, service mesh для TLS-шифрування між сервісами, а також под security standards (restricted, baseline). Усі запити між модулями проходять автентифікацію через JWT-токени, видані внутрішнім OIDC-сервером. Всі події аудиту зберігаються в Elasticsearch, що дозволяє відтворити повну хронологію роботи системи.

З технічного боку система підтримує роботу не лише в CPU-based середовищах, а й на апаратних прискорювачах. Якщо кластер має вузли з GPU або TPU, AI Decision Engine може використовувати їх для швидшої інференції моделей. Для оптимізації вартості застосовується GPU sharing через NVIDIA Device Plugin або Intel GPU Operator. У сценаріях високопродуктивних обчислень можливе використання FPGA через Kubernetes Device Plugin Framework, що дозволяє прискорити inference без перевантаження CPU.

Для безперервного розгортання AI-модуля використовується CI/CD-пайплайн із Jenkins або GitLab CI. Кожен коміт у репозиторії запускає збірку контейнера, автоматичне тестування, статичний аналіз коду та деплой у staging-кластер. Після перевірки – Canary rollout у продакшн через Argo Rollouts. Якщо нова версія працює стабільно, відбувається повний перехід. Це забезпечує нульовий downtime при оновленнях. Особливу роль у методі відіграє логіка intelligent feedback loop. Система порівнює заплановані рішення з фактичними результатами – час реакції, рівень латентності, витрати ресурсів – і використовує цю інформацію для самонавчання. Алгоритм reinforcement learning з використанням бібліотеки RLlib дозволяє AI Decision Engine самостійно оптимізувати політики дій на основі нагород і штрафів. Таким чином, система поступово вдосконалює свою поведінку без втручання людини. У результаті створюється інтегрована екосистема, де інтелектуальний модуль, Kubernetes і

DevOps-інфраструктура функціонують як єдиний організм. Кожен контейнер, сервіс і вузол є частиною динамічної системи, яка не лише реагує на зміни, а й передбачає їх. Адаптивна контейнеризація з інтеграцією штучного інтелекту забезпечує повний цикл автоматизації: від збору даних до самонавчального прийняття рішень, що дозволяє перейти від реактивного управління до автономної самооптимізованої інфраструктури.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні нового підходу до керування контейнерними системами, який поєднує можливості оркестрації Kubernetes із методами штучного інтелекту. Запропонований метод переходить від реактивної до адаптивно-прогнозної моделі управління, у якій рішення про масштабування контейнерів формуються на основі аналітичних моделей, що передбачають зміни навантаження. Вперше запропоновано архітектурну інтеграцію інтелектуального контролера в цикл керування Kubernetes без порушення його базової логіки, що забезпечує сумісність із нативними механізмами оркестрації. Метод реалізує замкнутий цикл «аналіз – прогноз – дія – перевірка результату», що створює основу для самооптимізованих контейнерних середовищ. Особливістю розробки є поєднання DevOps-, MLOps- і AIOps-підходів у межах єдиної інфраструктури, яка забезпечує безперервне навчання моделей і постійну адаптацію системи до змін навантаження. Дані результати формують наукову основу для побудови самонавчальних контейнерних платформ, здатних забезпечувати автономне керування ресурсами у хмарних середовищах.

Висновки. У роботі розглянуто метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту, який забезпечує новий рівень автономності та ефективності хмарних інфраструктур. Запропонований підхід дозволяє системі самостійно аналізувати поведінку навантаження, прогнозувати зміни та приймати рішення про масштабування контейнерів у реальному часі. Розроблений метод поєднує механізми оркестрації Kubernetes із аналітичними моделями машинного навчання, створюючи замкнутий цикл керування ресурсами, що забезпечує стабільність, продуктивність і оптимальне використання інфраструктури. Його впровадження дозволяє мінімізувати втрати продуктивності під час пікових навантажень, зменшити вартість експлуатації хмарних сервісів та підвищити надійність роботи мікросервісних систем. Отримані результати підтверджують перспективність інтеграції штучного інтелекту у процеси контейнеризації. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на практичну реалізацію прототипів самонавчальних кластерів, розширення функціональності AI-модулів і вивчення їх застосування у мультихмарних та edge-середовищах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Burns, B., Beda, J., Hightower, K. Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms for Scalable, Reliable Services. O’Reilly Media, 2018. – 246 с.

2. Chen, X., et al. Intelligent Autoscaling in Cloud Environments: A Survey. ACM Computing Surveys, 2021, Vol. 54(5), Article 114.
3. Morabito, R. Power Consumption of Virtual Machines vs Containers: A Comparative Study. IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E), 2015, pp. 30–37.
4. Mao, M., Humphrey, M. A Performance Study on the VM Startup Time in the Cloud. IEEE Cloud Computing, 2012, pp. 423–430.
5. Xu, X., et al. Deep Reinforcement Learning for Dynamic Resource Allocation. Future Generation Computer Systems, 2021, Vol. 125, pp. 253–266.
6. Kubernetes Documentation – Google Cloud, 2025 (дата звернення: 07.11.2025).
7. Docker Documentation – Docker, Inc., 2025 (дата звернення: 07.11.2025).
8. MLflow Tracking and Model Registry – MLflow, 2025 (дата звернення: 07.11.2025).
9. Red Hat. OpenShift AI and MLOps Integration Guide. Red Hat Publications, 2023. – 118 с.
10. Sutton, R. S., Barto, A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. MIT Press, Cambridge, 2018. – 556 с.
11. Haff, M. Architecting Kubernetes Clusters: Best Practices for High Availability. Packt Publishing, 2022. – 314 с.
12. Cisco DevNet. AIOps for Hybrid Cloud: Applying AI to IT Operations. Cisco Press, 2023. 189с.

УДК 004.9

Д.В. Іванов[1], В.В. Гнатушенко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗОВАНА ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ ТОПОГРАФІЧНИХ ПЛАНІВ МАСШТАБУ 1:2000

Анотація. У роботі розглянуто підхід до підвищення ефективності контролю якості цифрових топографічних планів масштабу 1:2000 шляхом впровадження автоматизованої геоінформаційної технології оцінювання просторових даних. Запропонована технологія базується на міжнародному стандарті ISO 19157:2013 і реалізує процес перевірки геометричної точності, топологічної узгодженості, логічної цілісності та повноти метаданих. Розроблене рішення реалізовано засобами Python із використанням бібліотек GeoPandas, Shapely, Fiona, GDAL. Отримані результати свідчать про значне скорочення часу перевірки, підвищення об’єктивності оцінки та можливість масштабування системи на інші картографічні масштаби.

***Ключові слова**: геоінформаційна технологія, цифровий топографічний план, масштаб 1:2000, контроль якості, просторові дані, валідація, топологічна узгодженість, автоматизація.*

Вступ. Сучасна цифрова трансформація систем просторового управління вимагає високої точності, достовірності та структурованості геоданих. Цифрові топографічні плани масштабу 1:2000 є базовою складовою інфраструктури просторових даних, що застосовуються у кадастрових, містобудівних, геодезичних і моніторингових процесах.

Попри існування державних стандартів (зокрема ДСТУ ISO 19157:2015), процес контролю якості цифрових картографічних матеріалів у більшості випадків залишається трудомістким і суб'єктивним. Відсутність інтегрованих програмних інструментів перевірки призводить до низької ефективності процедур валідації, збільшення витрат часу й можливості людських помилок.

У цьому контексті виникає потреба у створенні автоматизованої геоінформаційної технології, здатної забезпечити комплексну оцінку якості цифрових топографічних планів із використанням сучасних методів просторової аналітики та стандартизованих алгоритмів перевірки.

Постановка задачі. Метою роботи є розроблення геоінформаційної технології автоматизованого контролю якості цифрових топографічних планів масштабу 1:2000, що відповідає міжнародним і національним стандартам та дозволяє комплексно перевіряти якість просторових даних.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- проаналізувати чинні нормативи у сфері геоінформаційного картографування;
- формалізувати основні критерії оцінювання якості цифрових топографічних даних;
- спроєктувати модульну архітектуру системи контролю;
- реалізувати програмно-алгоритмічний модуль перевірки;
- провести апробацію технології на тестових наборах цифрових топографічних планів масштабу 1:2000.

Основний зміст роботи. Основою розробки є стандарт ISO 19157:2013 «Geographic information – Data quality», що визначає принципи та показники якості просторових даних: повноту, логічну узгодженість, топологічну правильність, точність позиціонування та достовірність метаданих. У дослідженні застосовано системний підхід, який охоплює всі етапи контролю – від перевірки вхідних даних до формування інтегральної оцінки якості.

Розроблена технологія має модульну архітектуру, що включає:

1. Модуль попередньої перевірки – визначає цілісність структури бази геоданих і відповідність форматів файлів.
2. Модуль аналітичної валідації – виконує перевірку геометричних і атрибутивних параметрів об'єктів.
3. Модуль топологічного аналізу – контролює відсутність самоперетинів, дублікатів, порушення меж полігонів і пересічення об'єктів різних класів.
4. Модуль оцінки метаданих – аналізує заповненість і достовірність описової інформації.
5. Звітний модуль – формує протокол перевірки з кількісними показниками та графічним відображенням помилок.

В рамках дослідження були визначені етапи перевірки якості цифрових топографічних планів у масштабі 1:2000 для автоматизованого процесу (рис. 1).

Програмна реалізація системи здійснена на основі мови Python із використанням бібліотек GeoPandas, Shapely, Fiona, GDAL. Такий підхід забезпечує підтримку відкритих форматів (SHP, GPKG, GeoJSON) і сумісність із поширеними ГІС-платформами.

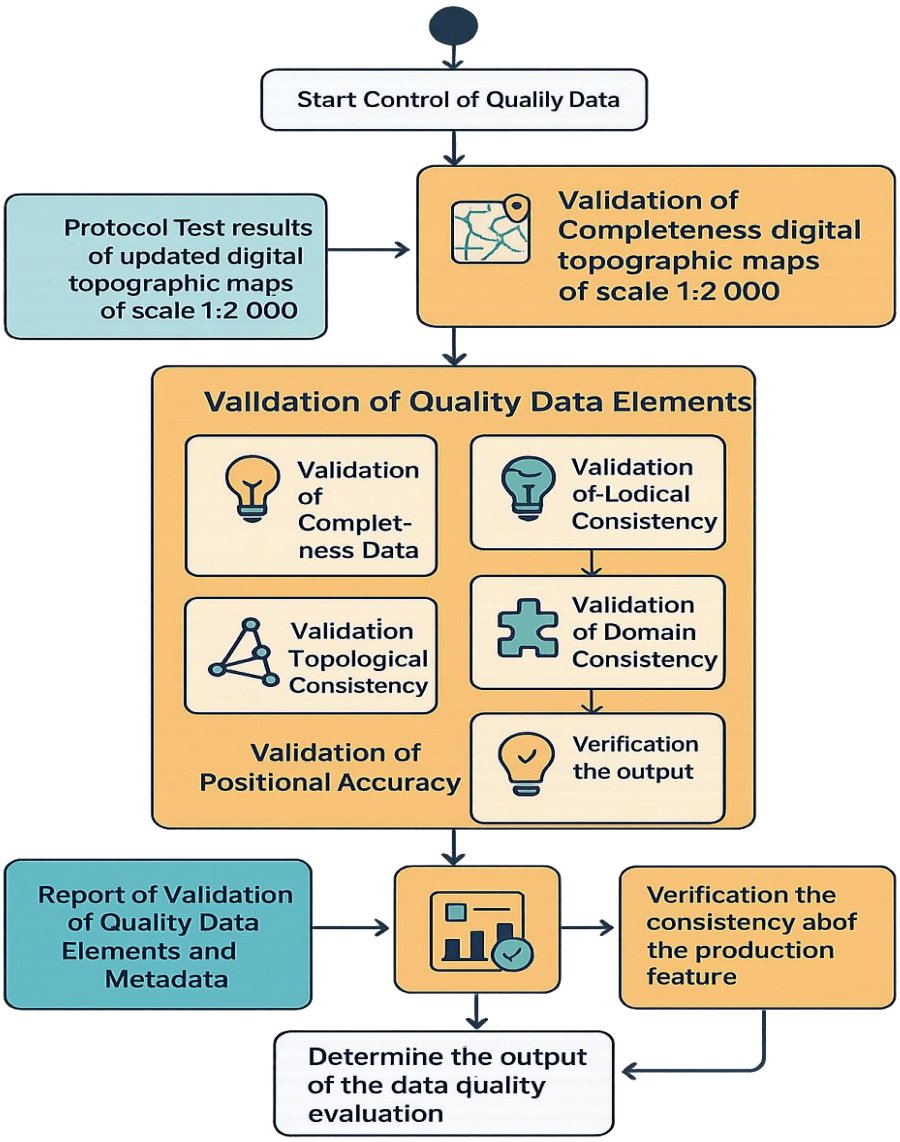


Рис. 1. Схема автоматизованого процесу оцінки якості цифрових топографічних планів масштабу 1:2000

На рисунку 2 наведено результати впровадження технології контролю якості цифрових топографічних планів у масштабі 1:2000. Представлені дані ілюструють ефективність виявлення й класифікації помилок у топографічних матеріалах.

Рис. 2. Результати впровадження технології контролю якості цифрових топографічних планів у масштабі 1:2000

Для оцінювання якості використано такі метрики:

1. Повнота (C) – відношення кількості об’єктів, що пройшли перевірку, до загальної кількості:

$$C = \frac{N_{коректних}}{N_{очікуваних}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

де

$N_{коректних}$ – кількість правильно відображених об'єктів;

$N_{очікуваних}$ – загальна кількість об'єктів за вихідними даними.

Нормативне значення: ≥ 96%.

2. Достовірність (Cr) – частка правильно класифікованих і атрибутованих об’єктів:

$$Cr = \frac{N_{правильних}}{N_{загальних}} \cdot 100\% \qquad (2)$$

де

$N_{правильних}$ – кількість об'єктів з правильною класифікацією та атрибуцією;

$N_{загальних}$ – загальна кількість перевірених об'єктів.

Нормативне значення: ≥ 95%

3. Топологічна правильність (T) – відповідність топологічним правилам (замкненість, відсутність перетинів, цілісність):

$$T = \frac{N_{виявлених_помилок}}{N_{загальних_помилок}} \cdot 100\% \qquad (3)$$

Зокрема для:

- Замкненості полігонів;
- Відсутності самоперетинів;
- Перетинів між об'єктами різних класів.
- Нормативне значення: ≥ 95%

4. Інтегральний показник якості (Q) – зважена комбінація попередніх параметрів, що характеризує загальну якість набору даних:

$$Q = w_1 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}\right) + w_2 \cdot \frac{C}{100} + w_3 \cdot \frac{Cr}{100} \tag{4}$$

де

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти;

$\sigma_{\max}$ – максимально допустима похибка (0.2 м).

Цільове значення Q: ≥ 0.95 (95%)

5. Часова ефективність:

- оцінюється як середній час перевірки цифрового плану площею 10 га;
- нормативне значення: ≤ 5 хвилин.

Під час апробації системи проведено серію тестів на вибірках цифрових топографічних планів масштабу 1:2000.

Отримані результати продемонстрували:

- рівень повноти даних – 97%;
- достовірність атрибуції – 95%;
- топологічна правильність – 97%;
- інтегральний показник – 96%;
- середній час перевірки плану площею 10 га – 4 хвилини 30 секунд.

Це підтверджує високу ефективність автоматизованої перевірки порівняно з ручними методами.

Наукова новизна полягає у створенні узагальненої моделі автоматизованого контролю якості цифрових топографічних планів, яка об’єднує структурно-логічний, топологічний та метричний аналіз у межах єдиного ГІС-середовища. На відміну від існуючих рішень, запропонована технологія передбачає адаптацію алгоритмів до різних форматів і масштабів геопросторових даних, а також можливість інтеграції в національні картографічні сервіси.

Висновки. Розроблена геоінформаційна технологія автоматизованого контролю якості цифрових топографічних планів масштабу 1:2000 забезпечує:

- комплексну перевірку просторових даних відповідно до стандартів ISO 19157:2013 та ДСТУ ISO 19157:2015;
- суттєве скорочення часу перевірки та зменшення впливу людського чинника;

- формування об’єктивних, відтворюваних результатів оцінювання якості;
- можливість масштабування й інтеграції з іншими ГІС-платформами.

Практична цінність роботи полягає у впровадженні ефективного інструменту автоматизованої валідації просторових даних для підвищення достовірності цифрових топографічних планів, що може бути застосовано у сфері геодезії, кадастру, будівництва та моніторингу територій.

Подальші дослідження планується спрямувати на розвиток інтелектуальних алгоритмів виявлення аномалій у просторових даних, інтеграцію машинного навчання та підтримку тематичних шарів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ ISO 19157:2015. Географічна інформація. Якість даних (ISO 19157:2013, IDT). – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2015.
2. Lazorenko-Hevel N., Karpinskyi Y., Kin D., Lets O. Automation of quality control of digital topographic maps at the scale 1:50 000 of the Main State Topographic Map in Ukraine. Proceedings of the International Cartographic Association, 2021, Vol. 4, P. 65. DOI: https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-65-2021
3. Чудовська В. А., Кінь Д. О., Іванченко О. С., Іванченко Я. В. Особливості застосування сучасних геоінформаційних технологій для створення топографічних планів. Land & Property Development: Innovations and Transformations: матеріали III Міжнародної конференції, 23–24 травня 2024 р. – Київ: КНУБА, 2024. – С. 101–104.
4. Малашевська О., Дідюра П. Актуальні завдання створення і оновлення цифрових карт і планів // Матеріали конференцій МЦНД. – 2023. – С. 145–146.
5. Стадніков В., Ліхва Н., Константінова О., Колосюк А. Досвід застосування ГІС-технологій при створенні (оновленні) цифрових топографічних карт масштабу 1:25000 // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4 (34). – С. 255–264.
6. Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.2024 № 67 «Деякі питання функціонування Державного картографо-геодезичного фонду України».
7. Nwilo P., Onyegbula J., Okolie C., Daramola O., Abolaji O., Arungwa I. Quality Assessment of the 20m SPOT DEM in Nigeria. arXiv preprint. 2022. arXiv:2205.02946. URL: https://arxiv.org/abs/2205.02946

УДК 004.056:004.94

Л.І. Мещеряков[1], А.В. Кожевников[1], С.М. Мацюк[1], А.А. Шарандо[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ВЕБ-ДОДАТКУ ЗБЕРЕЖННЯ ТА АНАЛІЗУ КРИПТОДАННИХ

Анотація. Представлено розроблений веб-додаток, що має змогу зберігати дані з біржі, конвертацію даних до індексів, та прогнозування на основі навченої моделі ціни криптовалюти та тренду курсу. Середній показник достовірності даної моделі складає 83%. На основі проведеного аналізу були запропоновані шляхи до удосконалення побудованої системи для покращення її точності та зручності практичного використання.

Ключові слова: *криптовалюта, методи спостереження та аналізу, нейронні мережі, біржа, Bitcoin, бази даних.*

Вступ. На даний час швидкими темпами розвивається новий ринок криптовалюти, цифрової платіжної системи, яка не покладається на банки для перевірки транзакцій. Це однорангова система, яка дозволяє будь-кому будь-де надсилати та отримувати платежі. Замість того, щоб бути фізичними грошима, які переносяться та обмінюються в реальному світі, платежі в криптовалюті існують виключно як цифрові записи в онлайн-базі даних, що описують конкретні транзакції, які реєструються в загальнодоступній книзі [1].

Свою назву криптовалюта отримала через використання шифрування для перевірки транзакцій. Це означає, що вдосконалене кодування бере участь у зберіганні та передачі даних криптовалюти між гаманцями та публічними книгами. Метою шифрування є забезпечення безпеки.

Разом з цим, зростає кількість фізичних осіб та компаній, основною задачею яких є торгівля валютою з метою отримання прибутку. Таким чином, розробка та застосування систем прогнозування курсу криптовалют у процесі прийняття рішення щодо здійснення операцій купівлі продажу криптовалюти являється дуже актуальною на сьогоднішній день. Можливість отримати достовірну інформацію наперед дає суб'єкту владу над ситуацією, можливість реально впливати на неї і змінювати на свою користь, зводити до мінімуму імовірність настання несприятливих наслідків і здійснювати ризик-менеджмент.

Постановка задачі. Дослідження та вдосконалення існуючої методики побудови прогнозуючих моделей та розробка системи підтримки прийняття рішень для короткострокового прогнозування курсу криптовалюти з використанням моделей нейронних мереж.

Основний зміст роботи. В результаті попередньо проведених досліджень вирішено для розробки використовувати серверну архітектуру функціонування веб- додатку з використанням мультиплатформеної мови Java. Наступним кроком здійснено аналіз, які саме бізнес процеси буде виконувати додаток та визначено, що спершу треба отримати історію криптовалютних пар з їх даними

з біржі торгівлі за маркетом криптобіржі P2P. Ці дані додаток трансформує та буде зберігати в базі даних. Для більш точного прогнозування програмою, було обрано різні дані, які будуть використані в ході навчання нейронної мережі. Перший тип даних має найважливішу вагу для покращення прогнозу моделі, це дані продажу через біржу, тобто маркет. Бо саме через продаж маркетом відбувалися найбільше операцій купівлі/продажу криптовалюти. Розділяються ці дані також за принципом розділення їх на два типи за часом: архівні дані за всі роки торгівлі на біржі, та поточні дані, які отримуються під час роботи веб додатка. Другий тип даних – це інформація про купівлю/продаж через сервіс криптобіржі P2P, де люди напряму торгують між собою. Після збереження даних, вони будуть використані нейронною мережею, для подальшого навчання, та прогнозування динаміки зміни ціни криптовалюти.

Процес отримання даних буде виглядати так, що користувач має зробити запит, з обраними параметрами, а саме: криптовалютну пару, за якої бажає отримати дані аналізу нейронної мережі для передбачення зміни ціни наступної години, вибрану біржу для якої потрібен аналіз (Рис. 1).

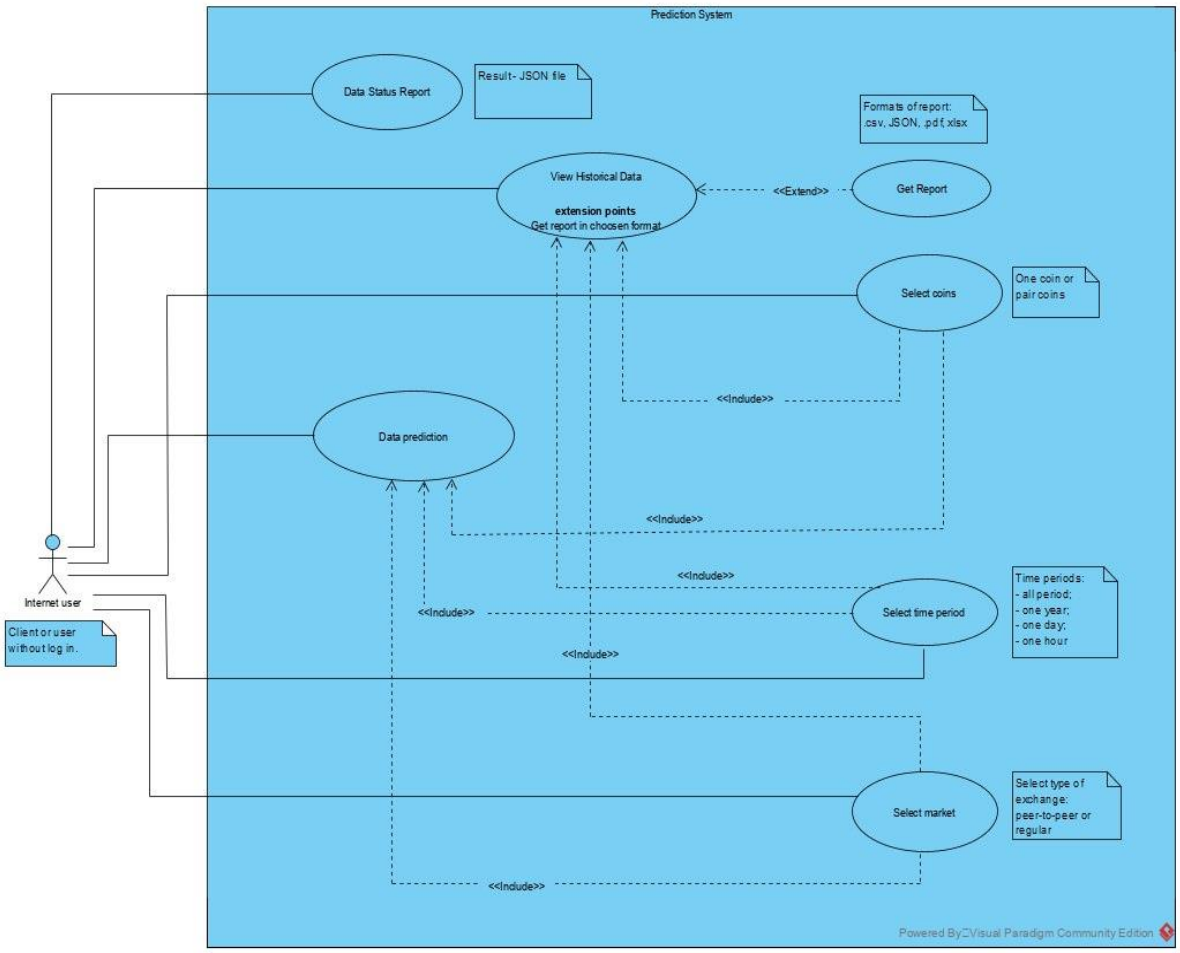


Рис. 1. Схематичне зображення принципу роботи веб-додатку

Для вирішення задачі формування архітектури веб-додатку був зроблений аналіз та прийняте рішення, що додаток потрібно розділити на дві частини. Перша частина веб додатку – Extractor. Ця частина відповідає за отримання та збереження даних які надходять з API біржі. Для цього був імплементован модуль для зв'язку з біржою, URL API якої знаходиться у ресурсних файлах.

Приклад отриманого JSON файлу з API Binance для BNBBTC пари:

{
"symbol": "BNBBTC",
"priceChange": "-94.99999800",
"priceChangePercent": "-95.960",
"weightedAvgPrice": "0.29628482",
"prevClosePrice": "0.10002000",
"lastPrice": "4.00000200",
"lastQty": "200.00000000",
"bidPrice": "4.00000000",
"askPrice": "4.00000200",
"openPrice": "99.00000000",
"highPrice": "100.00000000",
"lowPrice": "0.10000000",
"volume": "8913.30000000",
"quoteVolume": "15.30000000",
"openTime": 1499783499040,
"closeTime": 1499869899040,
"firstId": 28385, // First tradeId
"lastId": 28460, // Last tradeId
"count": 76 // Trade count
}

Для аналізу визначено, що потрібно лише частина даних, які надаються, а саме такі поля як: priceChange, openPrice, highPrice, lowPrice, openTime, closeTime. При запуску веб-додатка extractor, програма починає збирати всі архівні дані за вказаним переліком криптовалют, якщо їх нема у БД та запускає процес слідкування торгів. Після того як в біржі з'являться нові дані про трейди, програма у відведений час, подивиться чи є нові дані та добавить їх у БД також.

Друга частина веб-додатку це – Predictor. Підготовлені дані у БД зчитаються аналізатором, конфігурується нейрона мережа з налаштувань у коді та запускається довгий процес навчання з декількома епохами для всіх криптовалютних пар, що містяться у базі даних. Після того, як процес буде закінчено, програма перейде у стан донавчання з нових даних, що будуть надходити вже при виконані програми (Рис. 2).

Якщо модель готова до роботи, користувач може подати запит до серверу з необхідними параметрами, про бажання отримати прогнозування зміни динаміки ціни на ту чи іншу криптовалюту протягом години. Результатом буде

дані відсотка точності прогнозування, в якому напрямку буде зміна ціни криптовалюти, та на скільки приблизно буде змінена ціна.

Для покращення результату прогнозування нейронною мережею, було виділено необхідні параметри, які змінювали показник точності моделі до кращого результату. Методи можливо розділити на дві групи, в першу входять ті що будуть впливати на дані, які будуть надходити для навчання моделі. Друга група методів, це ті які покращать саме модель, через налаштування [2].

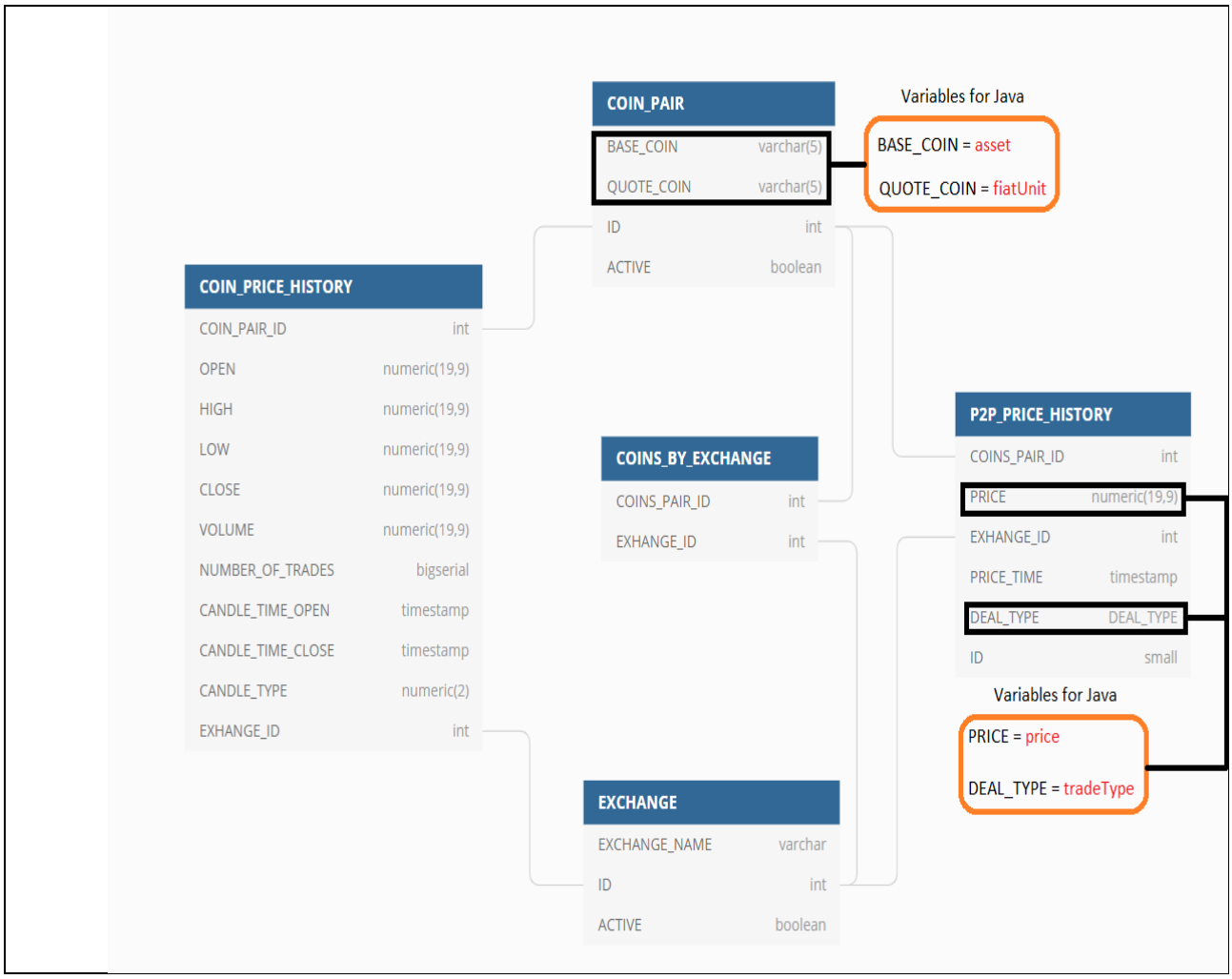


Рис. 2. Загальна архітектура веб-додатку

Індикатор – це функція, побудована на значеннях статистичних показників торгів (ціни, обсяг торгів тощо), аналіз поведінки якої покликаний відповісти питанням зміниться чи збережеться поточна тенденція над ринком. На основі аналізу технічних індикаторів трейдери, прихильники технічного аналізу, приймають рішення про відкриття (розширення) або закриття (скорочення) позицій. У цьому випадку технічні індикатори зазвичай застосовуються у вигляді графіків, накладених або поєднаних з графіками цін/об'ємів інструментів, що торгуються. Крім того, технічні індикатори тією чи іншою мірою

використовуються механічними торговими системами при алгоритмічній торгівлі [2]. Нижче представлений список індикаторів, які використані для надання моделі, як дані для навчання:

OBV – один із найпростіших технічних індикаторів, заснований на ціні та обсязі. Індикатор OBV являє собою кумулятивну ковзну середню обсягу торгів, взятого зі знаком плюс у разі зростаючого ринку і зі знаком мінус у разі падаючого.

$$OBV_t = OBV_{t-i} + \begin{cases} volume_t & \text{if } close_t > close_{t-i} \\ 0 & \text{if } close_t = close_{t-i} \\ -volume_t & \text{if } close_t < close_{t-i} \end{cases}, \tag{1}$$

де OBV_t – значення індикатора OBV в момент *t*; OBV_{t-i} – попереднє значення індикатора; $volume_t$ – обсяг торгів у момент *t*; $close_t$, $close_{t-i}$ – ціни закриття відповідно до поточного та попереднього періоду. Таким чином, якщо ціна зростає, значення індикатора також зростає, якщо ціна падає, значення індикатора падає [3].

SMA – це зміна N-денної простої ковзної середньої між учорашнім і сьогоднішнім днем із масштабним коефіцієнтом *N+1*, тобто:

$$\frac{momentum}{N+1} = SMA_{today} - SMA_{yesterday} \tag{2}$$

$$momentum = close_{today} - close_{N\ days\ ago}$$

це нахил або крутість лінії SMA, як похідна. Загалом цей зв'язок мало обговорюється, але він цікавий для розуміння сигналів від індикатора. Коли імпульс перетинає нуль, це відповідає спаду в SMA, а коли він перетинає нуль, це пік. Наскільки високий (чи низький) моментум стає очевидним, наскільки швидко зростає SMA [4].

EMA – різновид виваженої ковзної середньої, ваги якої зменшуються експоненційно і ніколи не дорівнюють нулю. Визначається наступною формулою:

$$EMA_t = \alpha \cdot p_t + (1-\alpha) \cdot EMA_{t-1}, \tag{3}$$

де EMA_t значення експоненційного ковзного середнього в точці *t* (останнє значення, у разі часового ряду); EMA_{t-1} – значення експоненційного ковзного середнього в точці *t-1* (попереднє значення у разі часового ряду); p_t – значення вихідної функції в момент часу t (останнє значення, у разі часового ряду); α – коефіцієнт, що характеризує швидкість зменшення ваг, приймає значення від *0* і

до *1*, чим менше його значення тим більше вплив попередніх значень на поточну величину середнього [4].

Перше значення експоненційного ковзного середнього зазвичай приймається рівним першому значенню вихідної функції:

$$EMA_0 = p_0. \tag{4}$$

Коефіцієнт α може бути обраний довільним чином, в межах від *0* до *1*. Наприклад, він може бути виражений через величину вікна усереднення:

$$\alpha = \frac{2}{n+1}. \tag{5}$$

Money Flow Index – технічний індикатор, покликаний показати інтенсивність, з якою гроші вкладаються в цінний папір і виводяться з нього, аналізуючи обсяги торгів та співвідношення типових цін періодів. Як ключовий ціновий показник для індексу грошового потоку використовується типова ціна, [5] яка розраховується за такою формулою:

$$typical\ price = \frac{high + low + close}{3} \tag{6}$$

Aroon Oscillator – технічний індикатор, що стежить за трендом, який використовує аспекти індикатора Aroon (Aroon Up і Aroon Down), щоб оцінити силу поточного тренду та імовірність його продовження. Показання осцилятора Aroon вище нуля вказують на наявність висхідного тренду, а значення нижче нуля вказують на спадний тренд. Трейдери спостерігають за перетинанням нульової лінії, щоб сигналізувати про можливі зміни тренду. Вони також спостерігають за великими рухами, вище 50 або нижче 50, щоб сигналізувати про сильні рухи ціни [6]. Визначається наступною формулою:

$$\begin{aligned}
&\text{Aroon Oscillator} = \text{Aroon Up} - \text{Aroon Down} \\
&\text{Aroon Up} = 100 * \frac{(25 - \text{Periods Since 25-Period High})}{25} \\
&\text{Aroon Down} = 100 * \frac{(25 - \text{Periods Since 25-Period Low})}{25}
\end{aligned} \tag{7}$$

Stochastic Oscillator – індикатор технічного аналізу, який показує положення поточної ціни щодо діапазону цін за певний період у минулому.

Вимірюється у процентах. Згідно з тлумаченням автора індикатора Джорджа Лейна (англ.), основна ідея полягає в тому, що при тенденції зростання ціни (зростаючий тренд) ціна закриття чергового таймфрейму має тенденцію зупинятися поблизу попередніх максимумів. При тенденції зниження ціни (падаючий тренд) ціна закриття чергового таймфрейму має тенденцію зупинятися поблизу попередніх мінімумів. Фактично, індикатор демонструє розбіжність ціни закриття поточного періоду щодо цін попередніх періодів у межах заданого проміжку часу [7].

Індикатор будується із двох ліній:

%K – швидкий стохастик (суцільна лінія, основний графік);

%D – повільний стохастик (пунктирна лінія, додатково усереднений графік).

Формула розрахунку:

$$\%K_t = \frac{C_t - Ln}{Hn - Ln} \cdot 100, \tag{8}$$

Для нейронної мережі було визначені такі методи оптимізації як:

Line gradient descent – це алгоритм, який знаходить найкращу лінію для заданого навчального набору даних за меншу кількість ітерацій. Якщо побудувати *m* і *c* проти MSE, він набуде форму чаші (Рис. 3). Тоді для деякої комбінації *m* і *c* можливо отримати найменшу помилку (MSE) [8].

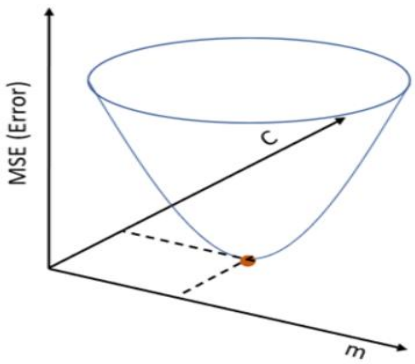


Рис. 3. Графічне зображення MSE

Така комбінація *m* і *c* дає найкращу лінію. Алгоритм починається з деякого значення *m* і *c* (зазвичай починається з *m=0, c=0*). Розраховується MSE (вартість) у точці *m=0, c=0*. Припускається, MSE (вартість) при *m=0, c=0* дорівнює *100*. Потім зменшується значення *m* і *c* на деякий крок (Крок навчання). Помічається зниження MSE (вартості). Продовжується робота далі, доки функція втрат не стане дуже малим значенням або в ідеалі буде дорівнювати *0* (що означає *0* помилок або *100*% точність).

Stochastic gradient descent – це ітераційний метод оптимізації цільової функції з відповідними властивостями гладкості. Його можна розглядати як стохастичне наближення оптимізації градієнтного спуску, оскільки воно замінює фактичний градієнт (розрахований на основі всього набору даних), його оцінкою (розрахованою на основі випадково вибраної підмножини даних). Особливо в задачах оптимізації великої розмірності це зменшує дуже велике обчислювальне навантаження, досягаючи швидших ітерацій у торгівлі за нижчого рівня конвергенції.

Adam – adaptive moment estimation, це оптимізаційний алгоритм. Він поєднує у собі ідею накопичення руху та ідею слабшого оновлення ваг для типових ознак.

В результаті досліджень було визначено необхідні параметри моделі, і нижче представлена готова модель з використанням бібліотеки deepLearning4J]:

```
MultiLayerConfiguration configuration = new
 NeuralNetConfiguration.Builder()
            .seed(System.currentTimeMillis())
           .optimizationAlgo(OptimizationAlgorithm.STOCHASTIC_GRADIENT_
DESCENT)
            .updater(new RmsProp(learningRate))
            .l2(1e-4)
            .list()
            .layer(0, new LSTM.Builder()
                  .nIn(NB_INPUTS)
                  .nOut(lstmLayer1Size)
                  .activation(Activation.TANH)
                  .gateActivationFunction(Activation.HARDSIGMOID)
                  .dropOut(dropoutRatio)
                  .build())
            .layer(1, new LSTM.Builder()
                  .nIn(lstmLayer1Size)
                  .nOut(lstmLayer2Size)
                  .activation(Activation.TANH)
                  .gateActivationFunction(Activation.HARDSIGMOID)
                  .dropOut(dropoutRatio)
                  .build())
            .layer(2, new DenseLayer.Builder()
                  .nIn(lstmLayer2Size)
                  .nOut(denseLayerSize)
                  .activation(Activation.RELU)
                  .build())
            .layer(3, new RnnOutputLayer.Builder()
                  .nIn(denseLayerSize)
```

```
            .nOut(1)
            .activation(Activation.IDENTITY)
            .lossFunction(LossFunctions.LossFunction.MSE)
            .build())
        .backpropType(BackpropType.TruncatedBPTT)
        .tBPTTForwardLength(truncatedBPTTLength)
        .tBPTTBackwardLength(truncatedBPTTLength)
        .build();
```

Середній результат точності даної моделі досягає значень 83%. Представлені на рис. 4 графіки відображають наглядні данні розробленої моделі за реальною ціною, яка змінилися протягом години.

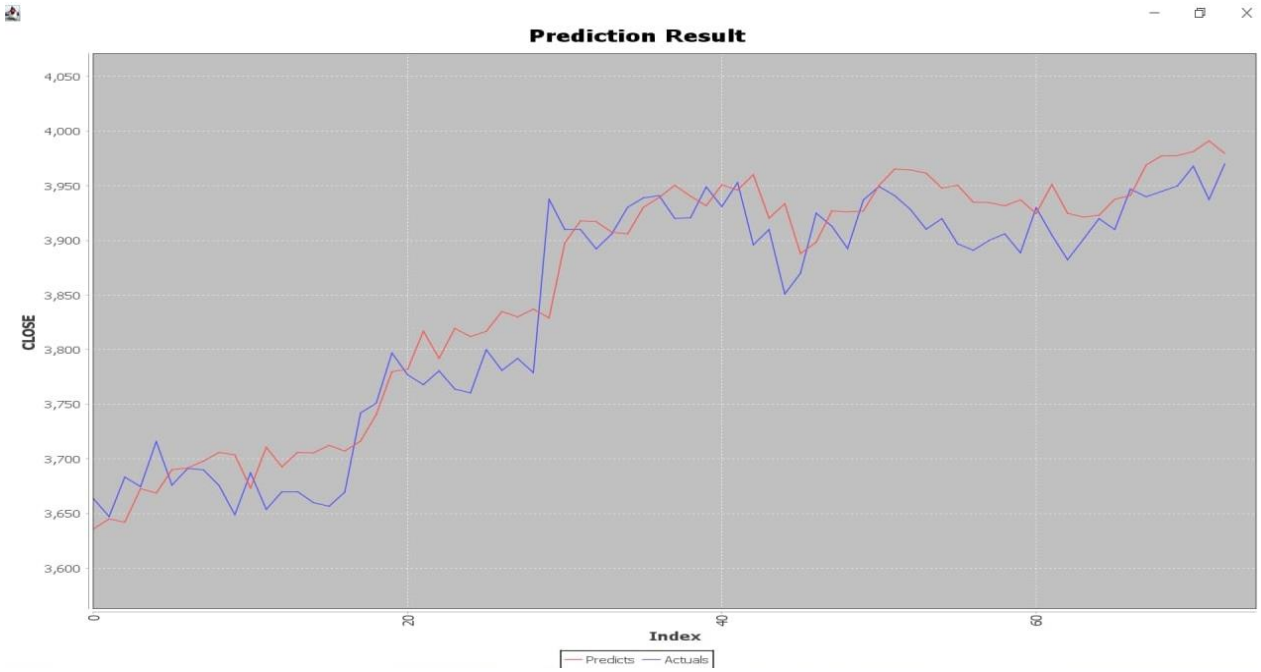


Рис. 4. Результат роботи прогнозування системи

Наукова новизна роботи Наукова новизна результатів роботи є відслідковування руху криптовалют та обґрунтування факторів впливу на зміну ціни за допомогою математичних індикаторів та історії динаміки у системі оцінювання та аналізу.

Висновки. Аналіз бірж продажу, показав всі переваги користування той чи іншою біржою з точки зору трейдера та розробника. Було виділено найбільш підходящу для роботи криптобіржу, API якої є безкоштовною, має найменш обмежень для отримання даних та має найбільшу історію трейдів, що покращую результат моделі аналізу та прогнозування в процесі навчання. Проведено аналіз типових математичних моделей, що використовуються при розв’язанні задачі прогнозу курсу, проведено порівняння цих методів в контексті розв’язку поставленої задачі та виявлено, що кращі результати дає нейронна мережа з

достатньо складною топологією і великою кількістю прихованих шарів та нейронів у них.

Розроблено веб-додаток, що має змогу зберігати дані з біржі, конвертацію даних до індексів, та прогнозування на основі навченої моделі ціни криптовалюти та тренду курсу. Середній показник достовірності даної моделі 83%. На основі проведеного аналізу були запропоновані шляхи до удосконалення побудованої системи для покращення її точності та зручності практичного використання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cryptocurrency Explained With Pros and Cons for Investment URL: https://www.investopedia.com/terms/c/cryptocurrency.asp. (дата звернення: 14.09.2022).
2. How to Handle Missing Data URL: https://towardsdatascience.com/how-tohandle-missing-data-8646b18db0d4 (дата звернення: 17.09.2022).
3. On-Balance Volume (OBV): Definition, Formula, and Uses as Indicator URL: https://towardsdatascience.com/erroranalysis-to-your-rescue-773b401380ef (дата звернення: 20.11.2022).
4. Simple Moving Average (SMA): What It Is and the Formula URL: https://www.investopedia.com/terms/s/sma.asp (дата звернення: 19.10.2022).
5. Money Flow Index - MFI Definition and Uses URL: https://www.investopedia.com/terms/m/mfi.asp (дата звернення: 21.10.2022).
6. Aroon Oscillator: Definition, Calculation Formula, Trade Signals URL: https://www.investopedia.com/terms/a/aroonoscillator.asp (дата звернення: 22.09.2022)
7. Stochastic Oscillator URL: https://corporatefinanceinstitute.com-resources/equities/stochastic-oscillator/ (дата звернення: 23.10.2022).
8. Linear Regression using Gradient Descent URL: https://towardsdatascience.com/linear-regression-using-gradient-descent-97a6c8700931 (дата звернення: 23.10.2022).

UDC 004.93:621.391

Oleksandr Holinko[1], Oleg Kuznetsov[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

INFORMATION AND TECHNOLOGICAL APPROACH TO POWERING THERMOCATALYTIC SENSORS IN AUTOMATED SECURITY SYSTEMS

Abstract. The main purpose of the present study is to improve the accuracy of determining concentrations of explosive gases and vapors in industrial environments by optimizing the power supply modes of thermocatalytic sensors operating as part of automated monitoring systems. The research combines theoretical modeling, analytical calculations, and experimental observations aimed at identifying the regularities of thermal processes occurring in the sensitive elements of sensors under various power supply schemes.

It has been demonstrated that conventional bridge circuits operating under stabilized voltage conditions fail to maintain a constant temperature field, which leads to cumulative measurement errors, signal instability, and gradual degradation of active elements. An improved power supply mode based on the stabilization of the electrical resistance of the working thermoelement has been proposed. This approach ensures constant temperature conditions, minimizes thermal overloads, reduces the risk of sensor damage, and significantly increases the operational stability and measurement accuracy of control systems.

Keywords: *industrial monitoring systems, explosion-hazard control, thermocatalytic sensor, resistance stabilization, thermal compensation*.

Introduction. At the current stage of industrial development, most technological processes involve the use of flammable gases, fuel–air mixtures, or volatile organic compounds. These components pose a potential risk of explosion and can cause large-scale accidents, equipment failures, and threats to human life. Therefore, the implementation of high-precision monitoring systems capable of continuously determining the concentration of hazardous substances in the air is an urgent priority.

The rapid progress of sensor technology, microprocessor systems, and digital signal processing algorithms has made it possible to automate explosion-safety monitoring. Modern systems can not only detect dangerous gas concentrations in real time but also trigger alarms, shut down equipment, or activate ventilation systems. However, the accuracy and stability of such systems largely depend on the reliability of their measuring converters—primarily thermocatalytic sensors [1].

The operation of thermocatalytic sensors is closely related to the thermal processes occurring on the surface of their sensitive elements. Environmental temperature fluctuations or unstable supply voltage directly affect the resistance of the thermoelement and, consequently, the accuracy of the readings. Hence, optimizing the power supply conditions becomes a crucial task to stabilize the thermal state of the sensor, minimize measurement errors, and ensure reliable performance of monitoring systems under a wide range of external conditions [2].

Main Content. In modern analyzers, catalytic thermal sensors are usually integrated into bridge measurement configurations. Traditionally, such circuits are powered by a stabilized voltage (Fig. 1, a). However, with such a connection, a change in the ambient temperature leads to variations in the thermal regime of the thermocouples, which causes significant errors in determining high concentrations due to the ambiguous temperature dependence of the thermal conductivity of gas media. This error can be reduced by using circuits that provide a more stable thermal regime of thermocouples during temperature fluctuations. In this context, configurations with voltage stabilization on one of the thermally sensitive elements are of interest [3].

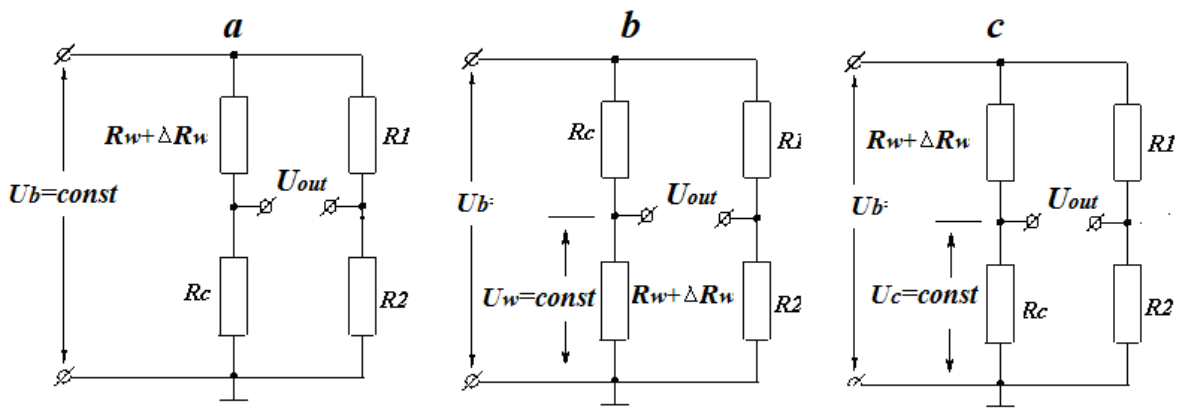


Fig. 1: Measuring bridge power supply circuits

Catalytic thermal sensors have significantly higher sensitivity and a different nature of the dependence of the resistance of the active element on the concentration of the measured component compared to thermal conductometric analogues. Therefore, additional studies of the features of their functioning are necessary to determine the optimal switching scheme. For unbalanced bridge configurations, the output signal is directly proportional to the supply voltage, so the error in the event of voltage instability will be proportional to its relative change. The active and comparator elements are made as identical as possible in resistance and geometry to ensure the stability of the zero indicator when changing uncontrolled parameters. The equation of the output signal of a bridge with a catalytic thermal sensor when supplied with a stable voltage has the form:

$$U_{out}^{a} = \frac{U_b \cdot R_1 \cdot \Delta R_w}{(R_1 + R_2) \cdot (R_w + \Delta R_w + R_c)}, \qquad (1)$$

where *U~b* ~ and *U~out* ~ are the supply voltage and the output voltage of the bridge, respectively; *R~w* ~ and *R~c* ~ are the resistance of the active and comparative elements of the thermal sensor ; Δ *R~w* ~ is the increase in the resistance of the active element due to the catalytic reaction.

For a simplified analysis, let's consider the case of identical thermocouple parameters. With a balanced bridge, the output voltage is:

$$U_{out}^{a} = \frac{U_b \cdot \Delta R_w}{2 \cdot (2R_w + \Delta R_w)}, \qquad (2)$$

A comparative analysis of different power supply modes shows that the greatest sensitivity is achieved when the voltage is stabilized on the comparator element, and the least - when stabilized on the active element. A serious drawback of the traditional scheme is overheating of the active element during oxidation of the combustible component. When measuring methane, the temperature increases by 30-50°C for each percent of concentration. This leads to a deterioration in the stability of the characteristics and a reduction in service life. In emergency situations, at concentrations above the lower flammable limit (LEL), damage to the sensor is possible.

When switched on with voltage stabilization on the active element, the heating from the power source during oxidation does not increase, but decreases. Temperature overloads are impossible in this case. From the point of view of maintaining the operability of the sensors, this option should be preferred. The decrease in sensitivity is insignificant, and the inherent nonlinearity is easily eliminated programmatically when using modern microcontrollers. When operating monitoring systems in Ukraine, the temperature can vary from -25°C to +35°C. The range of 60°C can affect the heating temperature of sensitive elements and cause significant errors. The theoretical dependence of the voltage on the active element on the current has the form:

$$U_w = I_e R_{0w}(1 + \beta t_a) + \beta b_w R_{0w} I_e^3, \qquad (3)$$

where I is the current through the thermocouples; $R{\sim}0{\sim}$ is the resistance at 0°C; $T{\sim}a$ ~ is the air temperature; α is the temperature coefficient of resistance; β is the thermoresistance coefficient.

When the temperature changes by ±30°C, the first term of the expression changes by ±12%. The condition for maintaining a constant thermal regime is:

$$R_w = \frac{U_w}{I_e} = const. \qquad (4)$$

This condition can be fulfilled only in the absence of heating from the flow of current, which is practically impossible. However, when using microcontrollers, it is possible to implement fundamentally different power supply modes with a stable temperature of the active element under any changes in the environmental parameters.

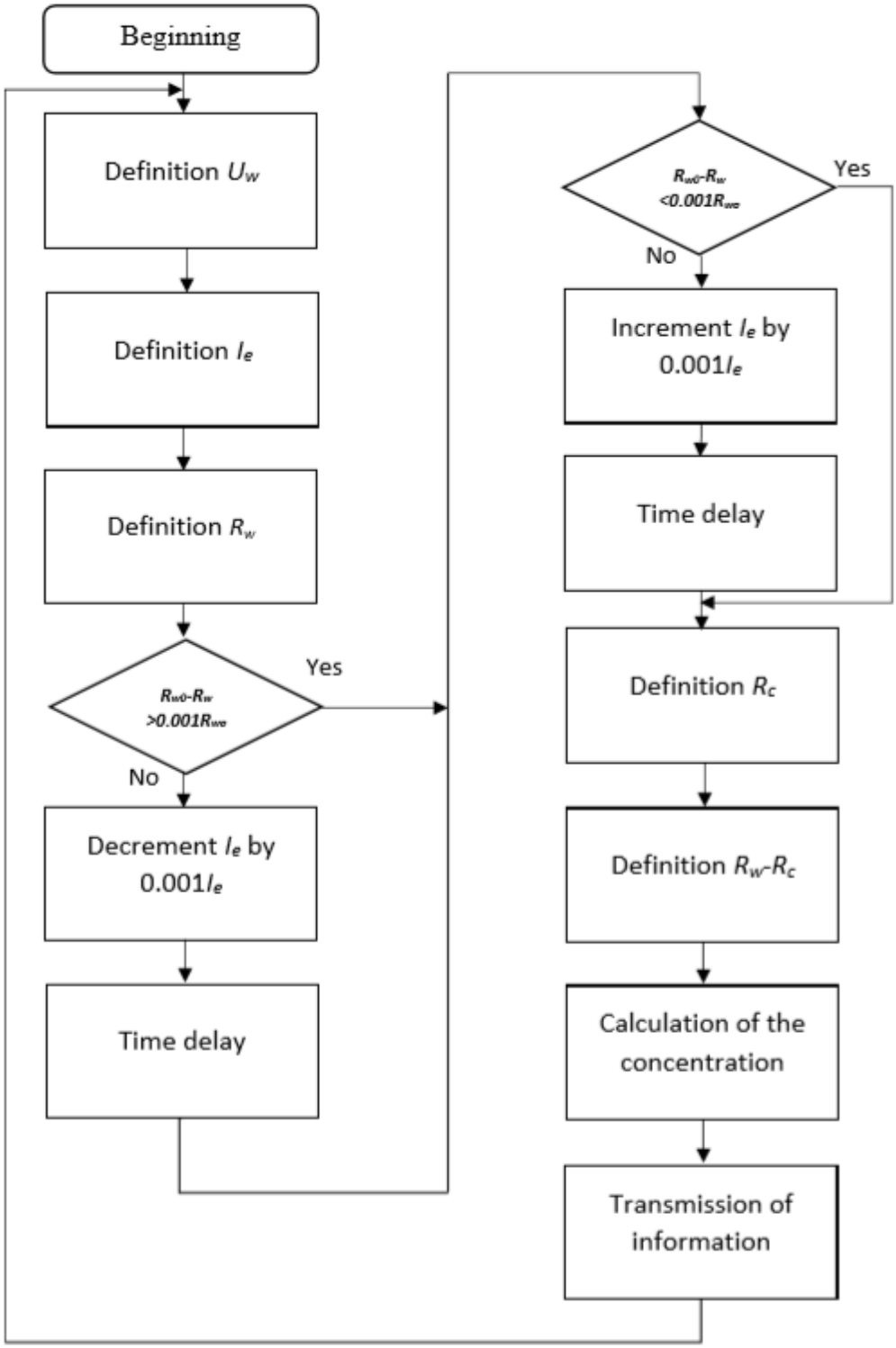


Fig . 2 Operating mode algorithm

When implementing the temperature stabilization mode, the primary converter contains active and comparative thermocouples and a current sensor (Fig. 2). The current sensor is a thermostable resistor with a low temperature coefficient of resistance. To fulfill condition (9), the current is controlled through the thermocouples in real time.

The resistance value of the active element is initially determined and memorized during commissioning, and during operation, the thermal regime is constantly checked and adjusted with the calculation of the concentration of the combustible component.

When determining the volumetric content of the combustible component, the gas pressure does not affect the results, since the diffusion flow does not depend on the pressure. The change in the temperature of the medium has practically no effect on the rate of the oxidation reaction when the temperature of the active element is stabilized.

The diffusion rate is proportional to the square root of the absolute temperature of the gas. The calculated relative error from the temperature change in the range of 283±30 K is 0.1%/°C. At fluctuations of ±30°C the relative error under boundary conditions is 3%. When determining the first threshold of 0.1 LEL the absolute error does not exceed ±0.003 LEL, which is an order of magnitude less than the existing errors of known analyzers.If there is a temperature sensor, it is possible to programmatically introduce corrections and practically reduce the error to zero.

Conclusions. The study confirms that traditional thermocatalytic sensor power schemes based on voltage stabilization cannot maintain a constant temperature of the working element, resulting in considerable measurement errors and potential overheating. Stabilizing the voltage on the working element partially mitigates these issues but reduces the sensor's sensitivity. The most effective solution is the resistance-stabilized power mode, which maintains constant temperature, prevents thermal overload, and reduces measurement errors by roughly an order of magnitude compared to conventional methods. Implementing this principle in modern microprocessor gas analyzers makes it possible to design more accurate, stable, and durable explosion-monitoring systems, significantly enhancing industrial safety and reliability.

REFERENCES

1. Samotaev, N., Dzhumaev, P., Oblov, K., & et al. (2021). Silicon MEMS thermocatalytic gas sensor in miniature surface mounted device form. Chemosensors, 9(12), 340.
2. Wöhrl, T., Herrmann, J., Kita, J., Moos, R., & Hagen, G. (2023). Methods to investigate the temperature distribution of heated ceramic gas sensors for high-temperature applications. Journal of Sensors and Sensor Systems, 12, 205–214.
3. Vasyl Holinko, Oleg Kuznetsov, Oleksandr Holinko, Olena Sharovatova (2025) Assessment of Power Supply Modes for Thermocatalytic Sensors in Explosion Hazard Monitoring Systems of Technogenic Facilities, Advances in Science and Technology (Volume 170). P.143-152..

УДК 004.4:004.738.5:659.3

В.В. Спірінцев[1], Д.А. Волошин[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЗДІЙСНЕННЯ SEO-АНАЛІЗУ ВЕБРЕСУРСІВ ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ

Анотація. В рамках роботи здійснено розробку та дослідження програмного забезпечення, що реалізує інформаційну систему для SEO-аналізу вебресурсів з метою подальшої їх оптимізації. Запропоновано підхід щодо реалізації комплексного рішення по ідентифікації більшості недоліків та помилок реалізації технічного аспекту пошукової оптимізації одночасно, що надає можливість виконувати подальшу оптимізацію вебресурсу та ефективне просування у мережі. SEO-аудит допомагає підвищити органічний трафік і покращити видимість вебресурсу в пошукових системах. Запропоноване рішення орієнтоване на власників компаній/фірм або приватних осіб, які мають свій власний вебресурс або займаються питаннями SEO-аудиту на комерційній основі.

Ключові слова: *SEO-аудит, пошукова оптимізація, семантичне ядро, пошукова система, Java.*

Вступ. При створенні вебресурсу компанії використовують складний індивідуальний комплекс маркетингових заходів спрямований на просування/актуалізацію бренду та предмету діяльності суб’єкту. При реалізації правильного підходу розвитку та ефективному застосуванні технологій пошукової оптимізації вебресурс стає потужним інструментальним засобом маркетингової спрямованості компанії. Актуальність досліджень не викликає сумнівів, оскільки SEO-аудит допомагає підвищити органічний трафік і покращити видимість вебресурсу в пошукових системах, що надає можливість зрозуміти, як ресурс сприймається пошуковими алгоритмами, виявити технічні проблеми, які перешкоджають індексації, та виправити їх, а також виступає незамінним елементом інтернет-маркетингу (ефективний інструмент просування та розвитку вебресурсу). Всі недоліки, які присутні на вебресурсі, головним чином пов’язані із неякісно проведеною технічною підготовкою під час експлуатації або у період реалізації, що помітно впливає на рейтинг вебресурсу [1-6]. Основна проблема полягає у знаходженні зазначених помилок та недоліків. Більшість проаналізованих інструментальних засобів SEO-аналізу орієнтовані на пошук певного недоліку, а не більшості з них одночасно [7-8]. Тому, актуальним є питання розробки та дослідження десктопного додатку, який дозволить здійснити SEO-аналіз певного вебресурсу задля знаходження більшості недоліків та помилок одночасно, які були зроблені при реалізації технічного аспекту SEO-оптимізації та заважають просуванню вебресурсу в мережі.

Постановка задачі. Мета даного дослідження полягає в підвищенні ефективності реалізації SEO-аналізу вебресурсів задля ідентифікації більшості недоліків реалізації технічного аспекту пошукової оптимізації (за рахунок

розробки та дослідження десктопного додатку), що забезпечить підвищення рангу відповідного вебресурсу та подальше ефективне його просування у мережі.

Основний зміст роботи. В рамках досліджень було здійснено розробку програмного забезпечення, що реалізує інформаційну систему для здійснення SEO-аналізу вебресурсів з метою подальшої їх оптимізації. В якості вихідних даних системи виступають: дані користувача, які він надає під час реєстрації; посилання на вебресурс, що потребує SEO-аудиту; дані з вебресурсу; токен авторизації користувача. В якості вихідних даних системи виступають: результат здійснення SEO-аудиту у вигляді звіту у різних форматах, що надається користувачу системи; результат роботи системи також виводиться до таблиць, блоків та діаграм.

Програмна реалізація інформаційної системи для SEO-аналізу вебресурсів була здійснена із застосуванням наступних технологій та мов програмування: Java – мова програмування розробки інформаційної системи; JavaFX – набір інструментів для реалізації графічної складової системи; Scene Builder – інструмент для конструювання інтерфейсу системи; IntelliJ IDEA – середовище розробки; Maven – конструктор проекту; Jsoup – бібліотека для роботи із HTML-файлами; GitLab – репозиторій для проекту; IText – бібліотека для роботи з PDF файлами; Apache POI – бібліотека для роботи з .XLSX файлами; Commons CSV – бібліотека для роботи із CSV файлами; MongoDB – для зберігання даних про користувача; ControlsFX, Swing – бібліотеки елементів графічного інтерфейсу; Log4j – бібліотека для логування.

На рис.1 наведено структуру папок, класів та ресурсів проекту у IDE. Основними пакетами є:

- controllers – містить усі контролери сцен застосунку, які реалізують їх функціональність та роботоспроміжність;
- logic – ця папка містить класи, які реалізують парсинг сайтів відповідно до критеріїв (у цьому пакеті знаходиться ядро програми);
- resources – ця папка містить такі дані як: язикові пакети та тексти, файли стилів css, файли сцен .fxml, різні зображення;
- models – ця папка містить у собі класи де містяться змінні, які будуть вміщувати у себе інформацію, зібрану з сайтів та над якими в подальшому будуть проводитися маніпуляції.

Розглянемо структуру та наповнення папок.

Папка controllers містить:

rightside – містить у собі контролери сцен, які будуть виводити оброблену інформацію та створювати таблиці.

Класи контролерів, які реалізують основні сцени додатку наведені на рис.3.

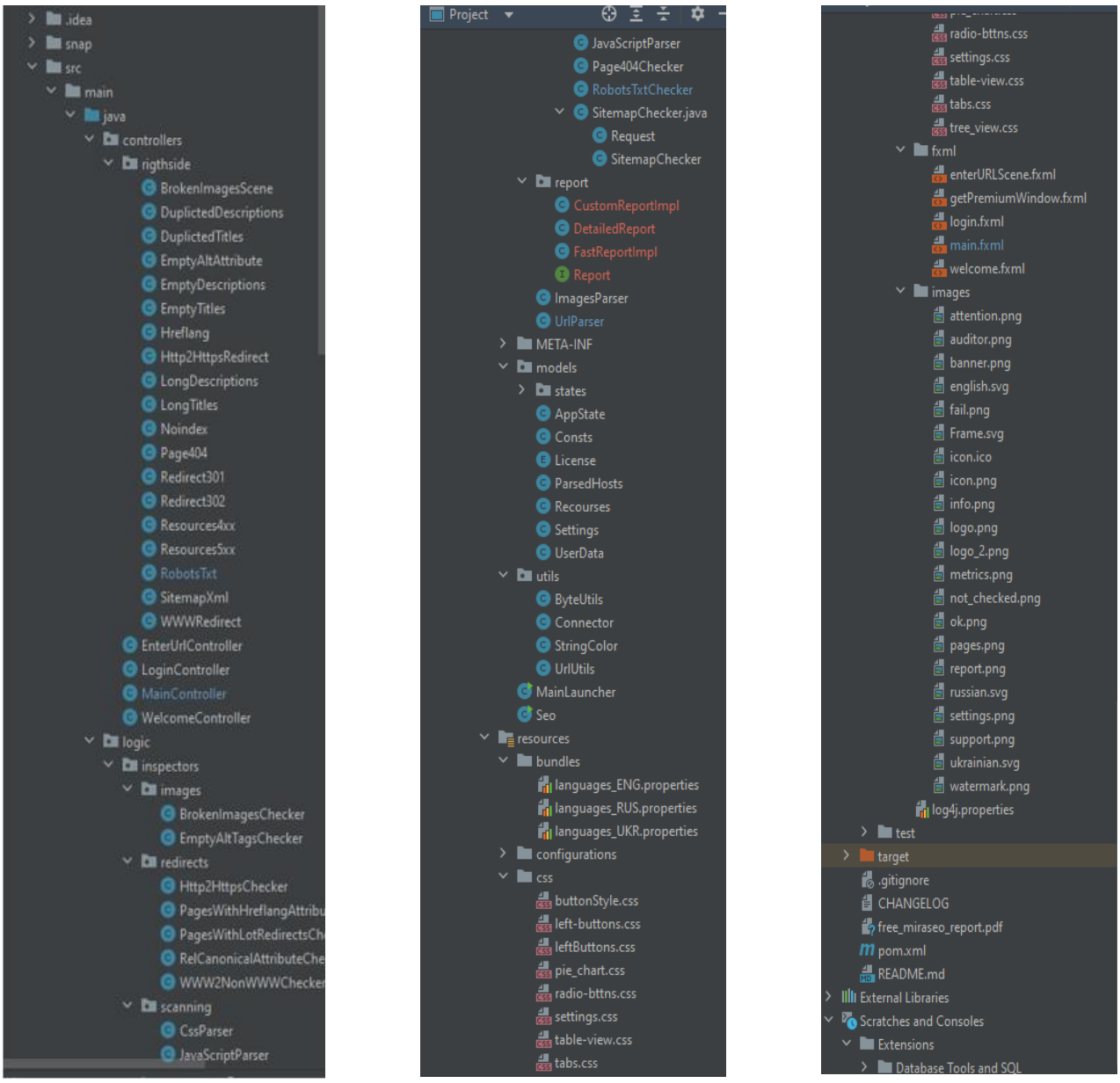


Рис.1. Пакети та класи проекту

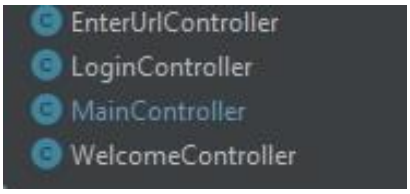


Рис. 3. Пакет controllers

WelcomeController реалізує функціонал стартової сцени із вибором дій (рис.4): залогінитися, придбати преміум та випробувати безкоштовну версію.

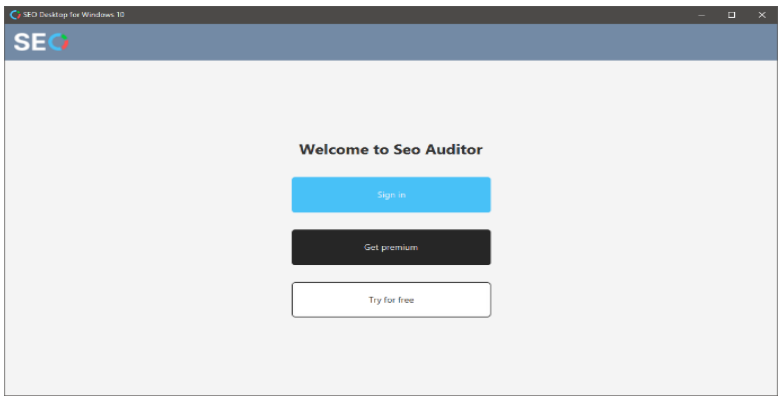


Рис. 4. Початкова сторінка

Клас LoginController реалізує функціонування сцени із введенням паролю та логіну користувача (рис. 5).

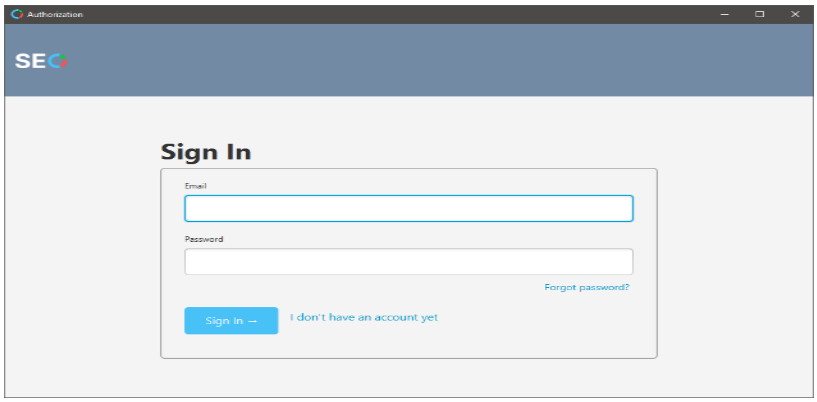


Рис. 5. Сторінка авторизації

EnterUrlController реалізує функціонал сцени із введенням посилання на сайт (рис. 6), який буде обробляти інформаційна система.

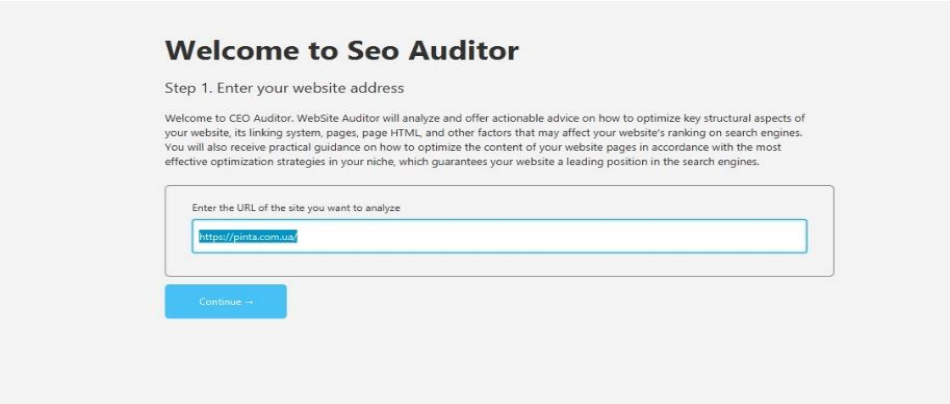


Рис. 6. Сторінка вводу посилання на сайт

MainController реалізує функціонал сцени із результатами, звітами, налаштуваннями (рис. 7).

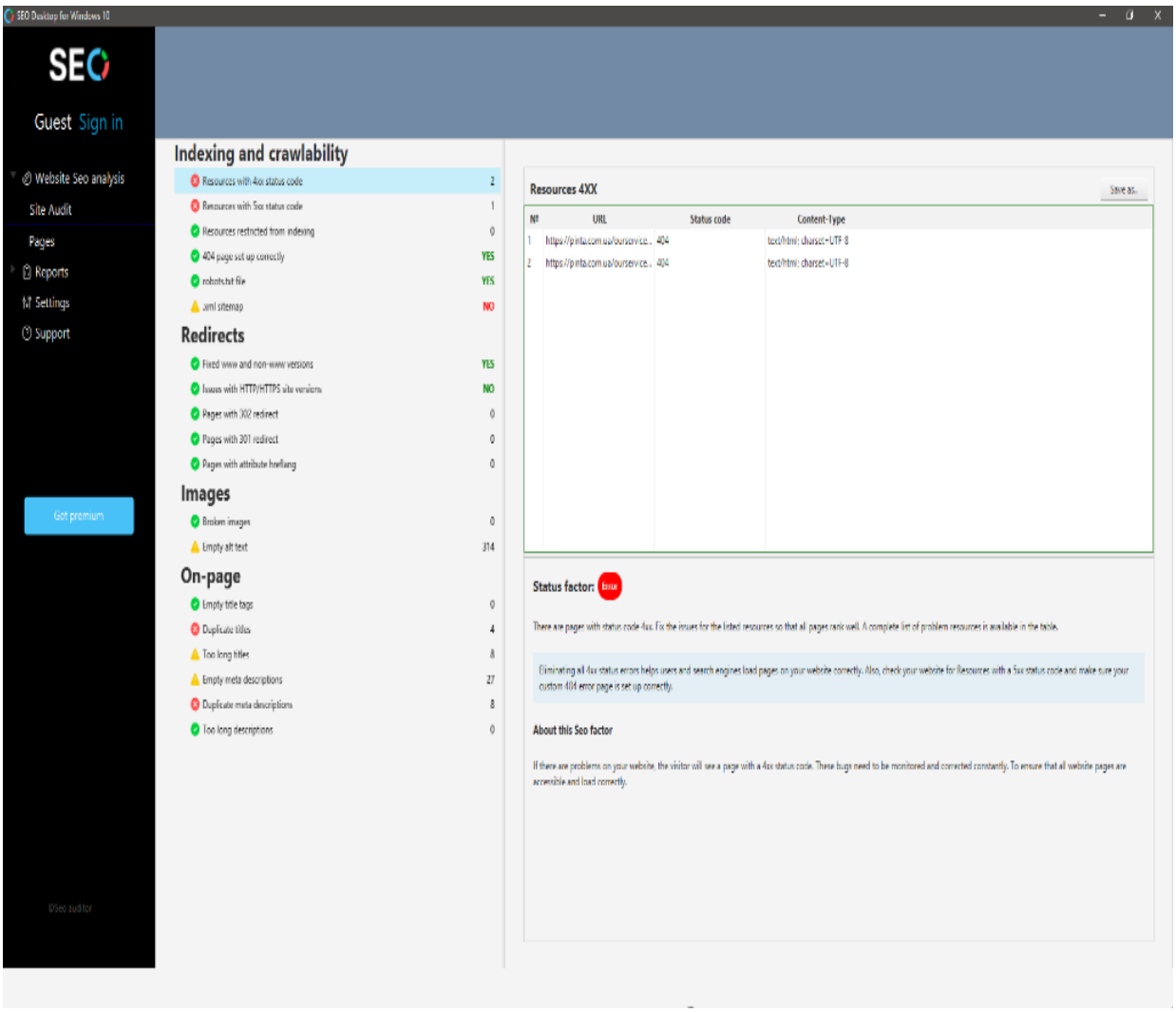


Рис. 7. Головна сцена

Зворотній зв’язок з клієнтами реалізований завдяки сервісу Zendesk та його сервісам. Zendesk – це вебсервіс з рядом програм для підтримки клієнтів та відвідувачів.

Пакет logic містить пакети images, redirects, scanning, де зібрані класи, що здійснюють пошук певних недоліків на сторінці сайту, яку на даний момент обробляє система. Перехід від однієї сторінки до іншої виконує клас UrlParser. Суть алгоритму полягає у переході від одної сторінки до іншої завдяки посиланням та збільшенню глибини входження.

Усі необхідні на сторінці елементи знаходимо завдяки html тегам. Для цього використовуються потоки вводу та виводу даних та їх методи, основним методом є метод filter(), який відокремлює необхідні дані з рядку.

Завантаження звітів може здійснюватися безпосередньо з таблиць, або у окремій вкладці з детальним звітом та швидким звітом.

Швидкий звіт генерує нову сцену із інформацією про кількість недоліків, скріншотом вебресурсу, графіком (рис. 8).

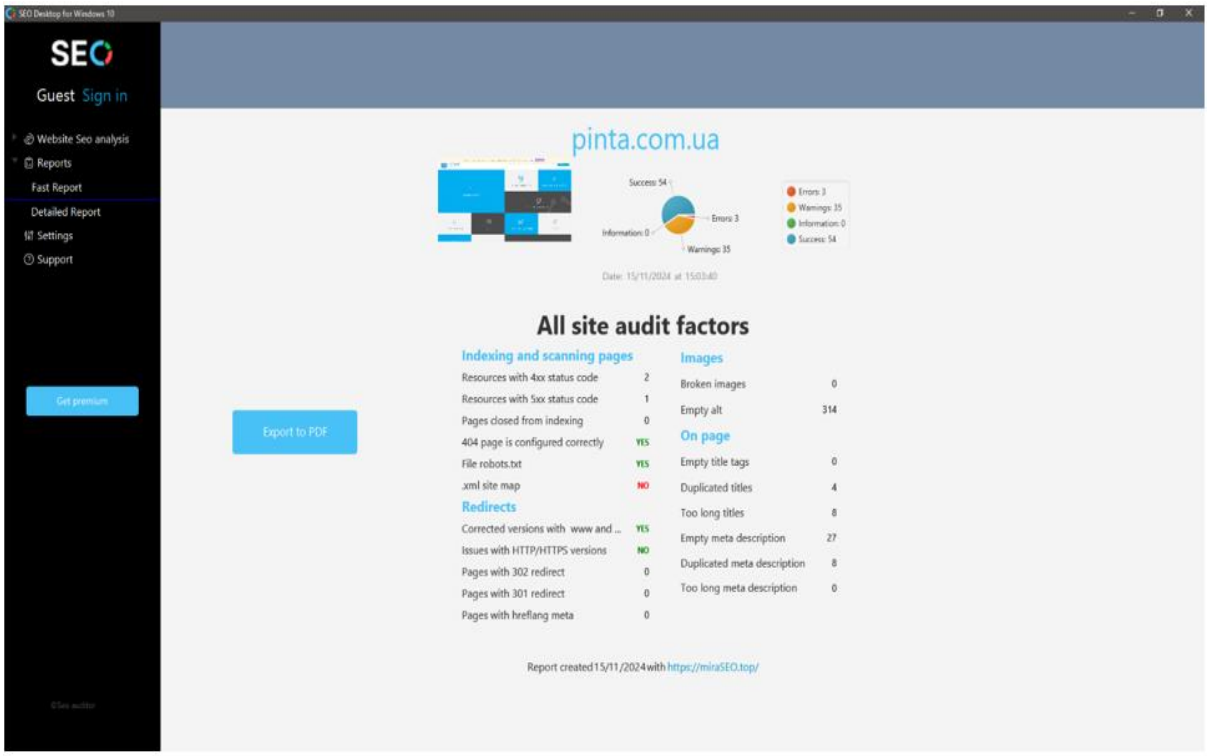


Рис. 8. Вкладка швидкого звіту

Також тут існує кнопка завантаження цього звіту у pdf форматі на локальну машину користувача, для подальшого опрацювання. Створення цього звіту реалізовано за допомогою бібліотеки IText. У коді ми створюємо таблицю та додаємо до неї клітинки, куди заноситься інформація зі змінних.

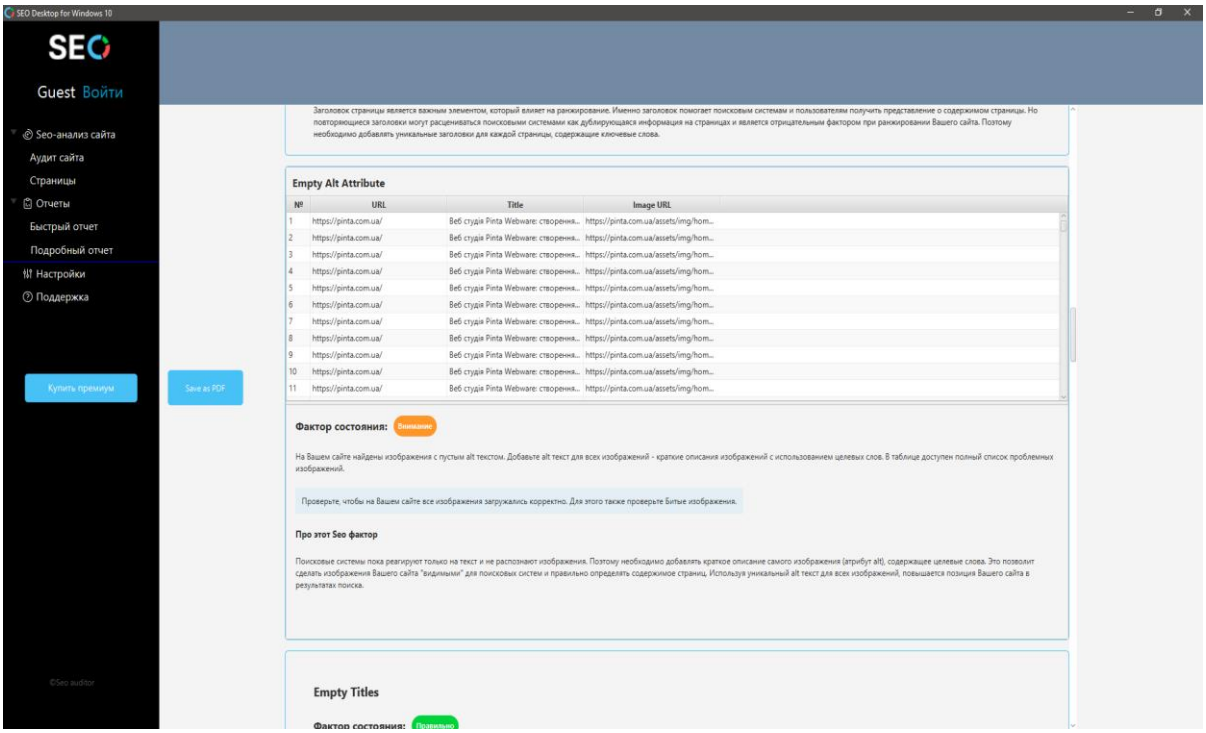


Рис. 9. Вкладка детального звіту

Наукова новизна. Новизна досліджень полягає у запропонованому підході, щодо реалізації комплексного рішення по ідентифікації більшості недоліків та помилок реалізації технічного аспекту пошукової оптимізації, що надає можливість виконувати подальшу оптимізацію вебресурсу та ефективне просування у мережі.

Висновки. В роботи запропоновано програмне забезпечення, що реалізує інформаційну систему для SEO-аналізу вебресурсів з метою подальшої їх оптимізації Функціональне призначення розробленої системи: надання універсального інструменту для здійснення SEO-аналізу певного вебресурсу задля знаходження більшості недоліків та помилок одночасно, які були зроблені при реалізації технічного аспекту SEO-оптимізації та заважають просуванню вебресурсу в мережі; надання можливості обрання різних сценаріїв входу в систему; забезпечення відвідувачам інформаційної системи простоти і комфортності доступу до функціоналу сцени із результатами, звітами, налаштуваннями за рахунок зручного та інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу; надання можливості адаптації інформаційної системи, щодо мови викладення; забезпечення захисту даних (дані користувача передаються з використанням спеціальних технік; профіль захищений паролем та логіном, що зберігаються на серверній частині та відомі лише користувачу); надання користувачам можливості завантаження звіту роботи системи у зручному форматі та ін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. SEO for Beginners: An Introduction to SEO Basics. SEJ. [Electronic resourse]/ URL: https://www.searchenginejournal.com/seo-guide/.
2. SEO Basics: Beginner's Guide to SEO Success. ahrefs blog. [Electronic resourse]/ URL: https://ahrefs.com/blog/seo-basics/.
3. What is Black Hat SEO? [Electronic resourse]/ URL: https://elit-web.com/blog/chto-takoe-black-hat-seo.
4. Eric Enge, Stephan Spencer, and Jessie C. Stricchiola SEO: The Art of SEO: Mastering Search Engine Optimization Third Edition. O`Reilly Media, Inc., 2017. 162p.
5. How to create a sitemap: a guide to successful SEO mapping [Electronic resourse]/ URL: https://seranking.com/blog/create-sitemap/.
6. What are SEO Friendly URLs (SEF) and why are they important? [Electronic resourse]/ URL: https://www.siteground.com/kb/what_are_search_engine_friendly_urls_sef/.
7. 26 SEO-інструментів, які можуть вам стати в пригоді [Електронний ресурс] / URL: https://hostiq.ua/blog/ukr/26-seo-tools-you-need//
8. Кращі безкоштовні SEO інструменти [Електронний ресурс] / URL: https://esfirum.com/blog/best-free-seo-tools/#bezkoshtovni-seo-instrumenti-dlya-analitiki.

УДК 004.415.3:681.6

О.С. Шевцова[1], П.О. Щербина[1], С.В. Григорян[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АДМІНІСТРУВАННЯ ОФІСНИХ СИСТЕМ У ГІБРИДНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Анотація. У доповіді проаналізовано сучасні тенденції розвитку та вдосконалення технологій адміністрування офісних систем у гібридному робочому середовищі. Розглянуто особливості поєднання локальних і хмарних компонентів, методи централізованого управління доступом і політиками безпеки, а також роль автоматизації в підвищенні ефективності адміністративних процесів. Обґрунтовано значення цифрової трансформації та адаптації офісних платформ до нових моделей роботи. Запропоновано напрями оптимізації, що включають використання інтелектуальних технологій, аналітики та єдиних систем керування ідентичностями.

Ключові слова: *гібридне робоче середовище, офісні системи, адміністрування, автоматизація, цифрова трансформація, інформаційна безпека, управління ідентичностями*.

Вступ. Перехід до гібридної моделі роботи, яка поєднує дистанційний і офісний формати діяльності, суттєво змінив підходи до адміністрування офісних систем. Такі зміни зумовлені потребою забезпечення безперервного доступу до корпоративних ресурсів незалежно від місця перебування співробітників, підтримки високої продуктивності та безпеки даних.

У цих умовах технології адміністрування стають ключовим елементом IT-стратегії підприємства. Вони охоплюють не лише технічні аспекти управління, але й організаційні процеси, що визначають взаємодію між користувачами, сервісами та системами безпеки.

За даними звіту *Gartner* (2023 р.), понад 80 % компаній планують зберегти гібридну форму роботи, що вимагає переходу до нових моделей управління офісними платформами [1]. Це підтверджує актуальність питання вдосконалення технологій адміністрування у гібридному робочому середовищі.

Постановка задачі. Гібридне робоче середовище - це організаційна модель, що поєднує традиційні офісні робочі місця з віддаленими цифровими платформами. Основною характеристикою такої моделі є одночасна присутність користувачів у локальній і хмарній інфраструктурах, що вимагає інтегрованих засобів адміністрування [2].

Офісні системи у гібридному середовищі включають:

- *Хмарні платформи (Microsoft 365, Google Workspace, Zoho Office)* - для спільної роботи;
- *Локальні сервери (файлові, поштові, ERP)* - для внутрішніх процесів;
- *Засоби віддаленого доступу (VPN, VDI, RDP)* - для безпечної роботи поза офісом;

- *Інструменти управління пристроями (MDM, Intune, JAMF)* – для контролю корпоративних і BYOD-пристроїв.

Управління такою інфраструктурою вимагає уніфікованої системи адміністрування, що забезпечує прозорий контроль користувачів, даних, ліцензій і безпеки [3].

Удосконалення технології адміністрування офісних систем передбачає створення адаптивного, автоматизованого середовища управління. Науковці відзначають кілька ключових напрямів його розвитку:

- Централізація управління. Використання єдиних консолей адміністрування, які дозволяють контролювати як локальні, так і хмарні сервіси з одного інтерфейсу. Такий підхід зменшує навантаження на адміністраторів і мінімізує ризик помилок [4].

- Автоматизація рутинних процесів. Сучасні офісні системи використовують сценарії (scripts) та програмні інтерфейси (API) для автоматичного створення користувачів, оновлення політик, моніторингу стану ресурсів.

- Застосування штучного інтелекту.Інтелектуальні алгоритми аналізують журнали подій, прогнозують можливі збої та пропонують рішення. Такі технології вже інтегровані у *Microsoft Copilot for Admin Center* та *Google AI Assist Admin Tools* [5].

- Інтеграція безпеки з адмініструванням.Безпека розглядається не як окрема функція, а як складова кожного процесу. Реалізується принцип Zero Trust, за якого доступ до ресурсів надається лише після перевірки користувача, пристрою та контексту підключення [6].

- Адаптація до гібридних інфраструктур.Адміністрування має враховувати змінну природу середовища, де частина користувачів працює локально, а інші - віддалено. Це потребує створення єдиних правил керування доступом, оновлень і резервного копіювання.

Основний зміст роботи. У гібридному середовищі однією з найважливіших задач є забезпечення єдиної системи автентифікації користувачів. Для цього використовуються технології федерації облікових записів (*Azure AD, Okta, OneLogin*), що підтримують єдиний вхід (SSO) і багатофакторну автентифікацію (MFA) [7].

Це дає змогу зменшити ризики компрометації облікових даних і підвищити зручність користувачів. Крім того, централізоване керування дозволяє швидко реагувати на зміни - наприклад, автоматично блокувати доступ при звільненні працівника.

В умовах гібридної роботи адміністратори не мають повного контролю над усіма пристроями. Тому впроваджуються системи моніторингу, які автоматично відстежують активність користувачів, використання додатків, стан мережі й безпеки.

Інструменти, такі як *Microsoft Endpoint Manager* чи *Google Admin Console*, дозволяють отримувати аналітичні дані про продуктивність систем, виявляти відхилення та автоматично застосовувати політики безпеки [8].

Ефективність адміністрування залежить не лише від технічних засобів, а й від рівня підготовки користувачів. Підприємства впроваджують політику «цифрової грамотності» - регулярне навчання персоналу роботі з офісними системами, правилам безпеки та віддаленої взаємодії [9].

Дослідження *ISACA* (2023 р.) показує, що компанії, які інвестують у підвищення цифрових компетентностей, зменшують кількість інцидентів безпеки на 35 % [10]. Для гібридних систем критично важливо забезпечити захист як локальних, так і хмарних даних. Використовується комбінована стратегія резервного копіювання - локальні копії на серверах і віддалені у хмарних сховищах (*Azure Backup, Veeam, Google Vault*).

Система адміністрування повинна автоматично керувати резервними копіями, перевіряти їхню цілісність і підтримувати можливість швидкого відновлення у разі збоїв [11].

Удосконалення технології адміністрування. Важливим напрямом розвитку є впровадження аналітичних і інтелектуальних систем, що забезпечують прогнозування проблем і оптимізацію управлінських процесів.

Predictive Monitoring дозволяє на основі машинного навчання прогнозувати навантаження на сервери, використання ліцензій і можливі помилки системи. Такі технології зменшують час простою та покращують стабільність роботи офісних платформ.

Аналітика користувацької активності (User Behavior Analytics) допомагає виявляти аномальні дії – наприклад, нехарактерні входи з інших країн або підозрілу активність у нічний час [12]. Це суттєво підвищує рівень інформаційної безпеки.

Висновки. Удосконалення технологій адміністрування офісних систем у гібридному робочому середовищі є невід'ємною складовою сучасної IT-стратегії підприємства. Нові моделі роботи потребують більш гнучких, автоматизованих і безпечних систем управління. Основними тенденціями розвитку є централізація адміністрування, автоматизація процесів, інтеграція з аналітичними інструментами, застосування штучного інтелекту та побудова єдиної системи управління ідентичностями. Комплексний підхід до вдосконалення адміністративних технологій сприяє підвищенню продуктивності, зниженню операційних витрат, зміцненню безпеки даних і формуванню стійкого цифрового середовища, придатного для ефективної роботи в умовах гібридного формату.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Gartner. *Future of Work Trends: 80% of Companies to Retain Hybrid Model by 2025.* - 2023. - https://www.gartner.com/en/newsroom
2. Orekhov S. E., Artamonov D. P. *Cloud Computing Technologies in Integrated Management Systems. - Infocommunication Technologies*, 18(4), 2020. - DOI:10.18469/ikt.2020.18.4.13.

3. TechSci Research. *Cloud Office Services Market Expected to Grow with a CAGR of 10.89% through 2029.* - 2025. - https://www.techsciresearch.com/news/20310-cloud-office-services-market.html
4. Mazula D., Lamprecht C. *Redefining Enterprise Cloud Technology Governance.* - *ISACA Journal*, Vol. 3, 2023.
5. Microsoft. *AI-Enabled Administration in Microsoft 365.* - 2024. - https://learn.microsoft.com
6. Google Cloud. *Zero Trust Security Model Implementation Guide.* - 2023. - https://cloud.google.com/security/zero-trust
7. Okta Inc. *The State of Identity and Access Management 2024 Report.* - 2024. - https://www.okta.com/resources
8. Microsoft Docs. *Endpoint Manager Analytics for Hybrid Work.* - 2023. - https://learn.microsoft.com
9. ISACA. *Digital Competence and Security Culture in Hybrid Organizations.* - 2023. - https://www.isaca.org/resources
10. Kayembe J., Ben Guirat I., Muehlberg J. T. *Exploring Privacy and Security as Drivers for Environmental Sustainability in Cloud-Based Office Solutions.* - *arXiv*, 2024.
11. Veeam Software. *Modern Data Protection for Hybrid Environments.* - 2023. - https://www.veeam.com
12. Cisco Systems. *User Behavior Analytics in Hybrid Networks.* - 2025. - https://www.cisco.com

УДК 004.415.3:681.6

С.Д. Приходченко[1], О.А. Атаманчук[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЙРОННИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕМОЦІЙ КОРИСТУВАЧІВ У ТЕКСТІ

Анотація. Досліджено підходи до автоматичної класифікації емоцій у текстах англійською та українською мовами з використанням актуальних методів машинного навчання. Було використано датасет “Emotion” із багатокласною розміткою емоцій, який було перекладено українською мовою за допомогою моделі NLLB-200 від Meta. Побудовано та порівняно кілька моделей: базову модель TF-IDF + Logistic Regression, класичну рекурентну BiLSTM та згорткову CNN, трансформерні моделі DistilBERT і XLM-RoBERTa, а також гібридну архітектуру XLM-RoBERTa + BiLSTM, яка поєднує контекстні ознаки трансформера з рекурентним аналізом послідовностей. Оцінювання ефективності було проведено за основними метриками accuracy, precision, recall, macro F1-score.

***Ключові слова**: нейронна модель; гібридна модель; емоційний аналіз тексту; багатомовні моделі; глибоке навчання; XLM-RoBERTa; BiLSTM; DistilBERT; CNN; BiLSTM, кросмовна класифікація; обробка природної мови; explainable AI (XAI); LIME.*

Вступ. За останні роки штучний інтелект та технології на його основі стрімкими темпами розвиваються, заміняючи стандартні методи обробки інформації та приносячи нові можливості для найрізноманітніших концептів. В наш час нейронні мережі впроваджуються в кожний аспект нашого

повсякденного життя допомагаючи як с простими так і зі складними завданнями. Вони сприяють оптимізації робочих процесів, автоматизації рутинних дій, покращенню якості обслуговування та прийняттю обґрунтованих рішень.

Окрім цього, значного розвитку набули системи обробки природної мови, які дозволяють машинам розуміти, інтерпретувати та генерувати людську мову. Одним з основних напрямів цих моделей є аналіз емоцій, такий аналіз має широке практичне застосування у різних сферах від покращення якості обслуговування клієнтів і рекомендаційних систем до моніторингу соціальних мереж, створення віртуальних асистентів, чат ботів, тощо.

Сучасні нейронні моделі демонструють високу точність у задачах розпізнавання емоцій оскільки здатні враховувати контекст, багатозначність слів, та складні мовні конструкції. Проте ефективність моделей може значно відрізнятися залежно від підходу, типу даних, та специфіки мови.

Саме тому аналіз ефективності різних нейронних моделей та підходів до обробки даних є актуальним, це дозволить порівняти їхні можливості, виявити сильні та слабкі сторони, а також обрати оптимальне рішення для практичного застосування для розпізнавання емоцій в україномовних або багатомовних текстів.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- Підготувати багатомовний корпус даних на основі англомовного датасету
- Реалізувати базову модель TF-IDF + Logistic Regression
- Навчити та протестувати нейронні моделі
- Створити гібридну модель XLM-RoBERTa + BiLSTM
- Провести комплексну оцінку якості моделей за основними метриками
- Здійснити аналіз моделей та на основі результатів зробити висновки

Основний зміст роботи. Нейронна модель – це математична структура, побудована за аналогією до біологічних нейронних мереж мозку людини, яка здатна навчатися на основі прикладів та узагальнювати інформацію для виконання певних завдань. Залежно від архітектури, нейронні моделі поділяються на різні типи: повнозв’язні (Feedforward Neural Networks), рекурентні (RNN, LSTM, GRU), конволюційні (CNN) та трансформерні (Transformer-based). Для задач обробки природної мови (NLP) найбільш ефективними на сьогодні є моделі, засновані на архітектурі трансформера, оскільки вони здатні враховувати контекст усіх слів у реченні одночасно, а не послідовно, як це роблять інші моделі.

Для дослідження було використано відкритий датасет “Emotion” який містить англомовні тексти, розмічені за шістьма основними емоціями, а саме: joy, sadness, anger, fear, surprise, та love. В цілях аналізу ефективності моделей у багатомовному середовищі, дататест було перекладено українською мовою за допомогою відкритої моделі NLLB-200 від Meta AI.

На першому етапі проведено базове порівняння із класичною моделлю TF-IDF + Logistic Regression, яка забезпечує орієнтовний рівень точності без використання глибинного навчання.

Надалі розглянуто нейронні архітектури BiLSTM та CNN, що дозволяють враховувати послідовність і контекст слів.

На фінальному етапі виконано експерименти з трансформерними моделями DistilBERT, XLM-RoBERTa та їх гібридним поєднанням із BiLSTM.

TF-IDF – це класичний підхід векторизації тексту, який перетворює текст у числове представлення, де кожне слово отримує вагу, що враховує частоту його появи у конкретному документі та у всьому корпусі.

Logistic Regression – це статистичний метод, який будує гіперплощину для розділення текстів за емоційними класами.

BiLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) – це різновид рекурентних нейронних мереж (RNN), здатний ефективно працювати з послідовними даними, зокрема текстом. На відміну від звичайної LSTM ця модель здатна обробляти текст у двох напрямках одночасно - від початку до кінця і навпаки. Завдяки цьому модель враховує як попередній, так і наступний контекст слова у реченні.

CNN – це згорткова нейронна мережа, яка розглядає послідовність токенів як матрицю ознак і застосовує фільтри (kernel) для виділення шаблонів, наприклад, словосполучень або граматичних структур.

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) – це нейромережева модель-трансформер від Google, на якій сьогодні будується більшість інструментів автоматичної обробки мови. BERT здатна до двонаправленого аналізу контексту та враховує як попередні, так і наступні слова у реченні, що дозволяє моделі глибше розуміти значення фраз.

DistilBERT – це спрощена (дистильована) версія BERT, яка зберігає приблизно 97% точності, але потребує на 40% менше параметрів і працює швидше. Він використовує лише 6 шарів замість 12, при цьому навчається наслідувати “вчителя” – повну модель BERT, модель дозволяє досягати гарного балансу між якістю та ефективністю.

RoBERTa – перепідготовлений BERT із кращим режимом тренування (більше даних, інші гіперпараметри), зазвичай перевершує оригінальний BERT на мономовних задачах.

XLM-RoBERTa – багатомовна модель, створена на основі архітектури RoBERTa, яка підтримує понад 100 мов, включно з українською.

XLM-RoBERTa + BiLSTM – запропонована гібридна модель яка поєднує сильні сторони моделей XLM-RoBERTa та BiLSTM. У цій моделі XLM-RoBERTa виступає як ембедер – вона перетворює кожне слово на контекстний вектор. Далі ці вектори подаються в BiLSTM, яка враховує порядок слів і часові залежності у послідовності.

Для об’єктивного аналізу якості класифікації емоційних станів у тексті було застосовано набір метрик, що дозволяють оцінити як загальну точність, так

і збалансованість результатів між різними класами а саме accuracy, precision, recall, macro F1-score.

Accuracy – це базова метрика, що відображає відсоток правильно класифікованих прикладів серед усіх прикладів тестового набору, розраховується за формулою (1):

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

де, TP (True Positive) – правильно передбачені позитивні класи; TN (True Negative) – правильно передбачені негативні класи; FP, FN – помилки класифікації.

Окрім середніх метрик, для кожної моделі генерувався повний звіт по класах (див. таб. 1), що містить:

- Precision, Recall, F1 – score для кожного емоційного класу (0–5);
- Support – кількість прикладів певного класу;

Таблиця 1

Зведений звіт по класах для distilBERT, train EN test EN

Клас	**Precision**	**Recall**	**f1-score**	**Support**
0 (sadness)	0.9760	0.9614	0.9686	466
1 (joy)	0.9785	0.9347	0.9561	536
2 (love)	0.8511	0.9231	0.8856	130
3 (anger)	0.9000	0.9583	0.9283	216
4 (fear)	0.8607	0.8918	0.8759	194
5 (surprise)	0.7544	0.7414	0.7478	58

Precision – це метрика що показує, яку частку передбачених елементів певного класу модель класифікувала правильно, розраховується за формулою (2):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Recall – це метрика що визначає, яку частку реальних позитивних прикладів модель змогла знайти, розраховується за формулою (3):

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

F1-score – це метрика яка об'єднує точність та повноту в одну метрику, що показує баланс між цими двома характеристиками, розраховується за формулою (4):

$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{4}$$

Macro F1-score – це середнє арифметичне F1-значення, обчислене окремо для кожного класу без урахування кількості прикладів, розраховується формулою (5):

$$F1_{\text{macro}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} 2 \times \frac{\text{precision}_i \times \text{recall}_i}{\text{precision}_i + \text{recall}_i} \tag{5}$$

де, N - кількість класів.

Вона є основною метрикою тому що враховує всі класи однаково, навіть при дисбалансі у датасеті. Це дозволяє справедливо оцінити ефективність моделей на рідкісних емоціях та емоціях, що часто зустрічаються.

В результаті ряду експериментів для різних архітектур – від класичних до сучасних трансформерів було здійснено порівняльний аналіз їхньої ефективності на англомовних і україномовних тестових наборах (див. таб. 2)

Під час дослідження моделі було проведено три типи експериментів: навчання та тестування на англійській мові, навчання на англійській мові та тестування на українській і навчання та тестування на українській. Такий підхід дозволив оцінити як точність, так і узагальнювальну здатність моделей у кросмовному середовищі.

Перший тест (EN-EN) демонструє максимально можливу продуктивність моделі, оскільки вона працює в межах тієї самої мови, на якій була натренована.

За Macro F1 найкращі результати показують Hybrid (XLM-RoBERTa + BiLSTM) (0.9058), RoBERTa та DistilBERT – на одному рівні за результатами ~ 0.89, проте час тренування в моделі DistilBERT виявився в два рази швидше, що підтверджує ефективність спрощенної моделі. Трохи нижче – CNN (0.8768), помітно гірше BiLSTM (0.8041) і TF-IDF+LR (0.6944). Картинка по Accuracy аналогічна (0.9381 у Hybrid проти 0.9325 у roBERTa/distilBERT).

На рідній для тренування мові всі трансформери випереджають класичний baseline і чисті рекурентні/згорткові моделі.

Другий тест (EN-UA) спрямований на дослідження крос-лінгвальної узагальнювальної здатності – наскільки добре модель, навчена на одному

мовному корпусі, здатна переносити знання на іншу мову без додаткового донавчання.

Таблиця 2

Результати тестування

Model	**Macro F1**			**Accuracy**		
	train EN test EN	train EN test UA	train UA test UA	train EN test EN	train EN test UA	train UA test UA
TF-IDF + LR	0.6944	0.0857	0.4217	0.8056	0.3356	0.5981
BiLSTM	0.8041	0.0411	0.3060	0.8669	0.1363	0.4644
CNN	0.8768	0.0877	0.4271	0.9131	0.3356	0.5575
distilBERT	0.8937	0.2071	0.7522	0.9325	0.3050	0.8019
roBERTa	0.8952	0.5187	0.7764	0.9325	0.6119	0.8206
Hybrid	0.9058	0.5562	0.7942	0.9381	0.6347	0.8331

Тут падіння продуктивності – очікуване і різке для немультимовних методів: TF-IDF+LR (0.0857), BiLSTM (0.0411), CNN (0.0877), оскільки ці моделі фактично не здатні правильно працювати через те, що векторний простір і словник були натреновані на іншій мові.

Натомість мультимовні трансформери зберігають суттєву частину якості: Hybrid - 0.5562, roBERTa - 0.5187. DistilBERT - 0.2071 помітно відстає, тому що англомовний варіант і гірше переносить знання на українську.

Для cross-lingual задач критично потрібні саме мультимовні представлення (XLM-RoBERTa). Поєднання їх з BiLSTM додатково підсилює стійкість до перекладацьких артефактів, але приріст помірний – отже головна робота переносу робиться саме багатомовним трансформером.

Третій тест (UA-UA) дозволяє оцінити, як моделі поводяться на повністю локалізованих даних після перекладу корпусу англійських текстів українською за допомогою моделі NLLB-200.

Після побудови повноцінного україномовного корпусу мультимовні моделі піднімаються майже до рівня англійського сценарію: Hybrid - 0.7942, roBERTa - 0.7764, distilBERT - 0.7522. Класичні методи TF-IDF+LR (0.4217) і CNN (0.4271) помітно гірші, а BiLSTM (0.3060) найслабший. Accuracy корелює: 0.8331 у Hybrid, 0.8206 у roBERTa та 0.8019 у distilBERT.

Перекладений корпус дозволяє закрити мовний розрив. З огляду на кросмовний експеримент, саме багатомовність встановлює верхній ліміт якості.

В результаті ми бачимо наступну картину:

Найкраща загальна модель – Hybrid. Вона лідирує у двох з трьох сценаріїв (EN-EN і UA-UA) та показує найвищу стійкість у EN-UA. Різниця з roBERTa невелика (≈+0.01…+0.02 Macro F1), але стабільна, тобто BiLSTM додає «підчистку» послідовнісних патернів поверх контекстних ембедінгів.

roBERTa – найкраща «чиста» архітектура. Вона дуже близька до Hybrid і помітно обходить distilBERT у крос-мові, для застосунків, де важливі простота і менша складність, roBERTa - сильний компроміс.

distilBERT – оптимальний у часових/ресурсних обмеженнях. У EN-EN він дуже сильний (0.8937), але перенос на UA без донавчання суттєво слабший (0.2071), що обмежує його для багатомовних рішень.

CNN/BiLSTM/TF-IDF+LR: у монолінгвальному EN вони поступаються трансформерам; у EN-UA різко деградують через словниково-морфологічний зсув; у UA-UA піднімаються, але лишаються нижче мультимовних трансформерів.

Для глибшого аналізу результатів роботи моделі, яка показала найкращий результат, та підвищення інтерпретованості було застосовано підходи пояснюваного штучного інтелекту (XAI).

У дослідженні використано кілька методів XAI:

Attention Visualization – дозволяє візуалізувати, на які слова модель XLM-RoBERTa + BiLSTM звертає найбільшу увагу під час класифікації.

LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) - аналізує внесок окремих слів у прогноз моделі для конкретного прикладу, що допомагає оцінити локальну стабільність результатів (див. рис. 1, 2).

Аналіз прихованих станів BiLSTM – демонструє, як двонаправлені рекурентні шари реагують на різні частини тексту, відображаючи структуру внутрішніх представлень емоційних контекстів.

Модель класифікувала цей приклад як “радість” (joy) із впевненістю 0.97.

LIME підсвічує слова:

- задоволений (0.50) – головний предиктор позитивної емоції;
- дуже (0.09) – підсилює емоційне забарвлення.

Інші слова (нашим, рішенням, навчання) мали мінімальний вплив, що демонструє концентрацію уваги моделі саме на емоційно насичених елементах речення.

Модель із високою ймовірністю (0.99) класифікувала цей текст як “sad” (сум).

LIME виділяє ключові слова, що найбільше вплинули на класифікацію:

- disadvantaged (0.28) – головний індикатор негативного емоційного контексту;
- feel, so, and, kept, but – слова, що посилюють рефлексивний тон висловлювання.

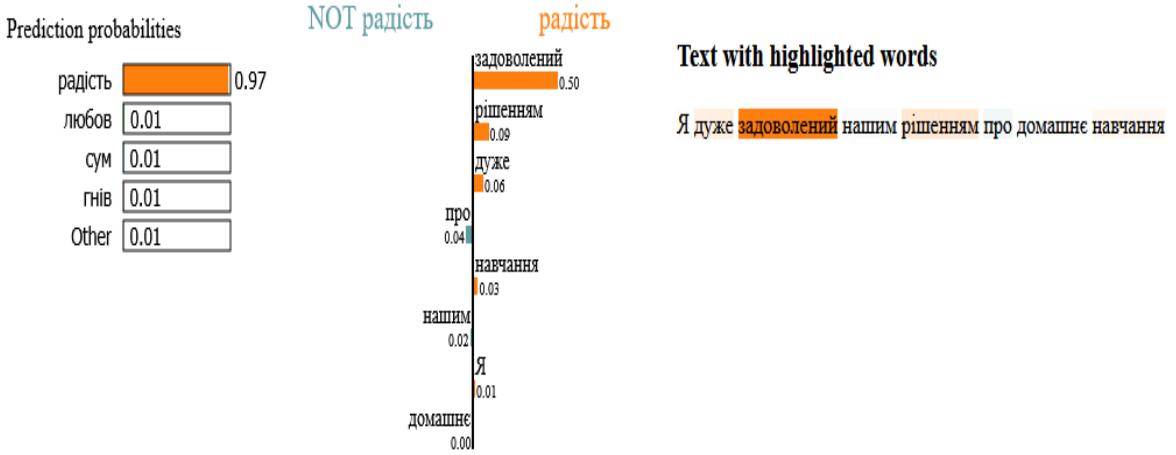


Рис. 1. LIME для українського тексту

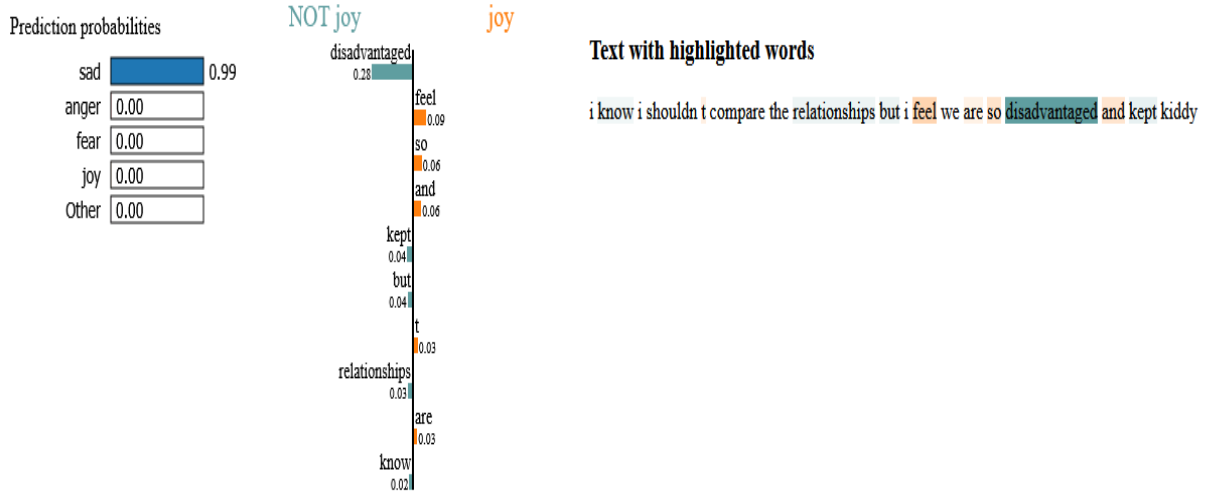


Рис. 2. LIME для англійського тексту

Таким чином, пояснення показує, що наявність особистісного займенника I feel у поєднанні з негативною оцінкою (disadvantaged) чітко вказує на емоцію суму.

LIME-пояснення підтверджують, що модель не лише правильно класифікує емоції, а й орієнтується на смислово релевантні слова, а не випадкові токени.

У випадку англійської мови модель звертає увагу на контекст і семантичні зв’язки між словами (feel disadvantaged), а в українській – на морфологічно виражені емоційні прикметники (задоволений, дуже).

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до порівняння різних архітектур нейронних мереж у задачі емоційної класифікації тексту з

урахуванням кросмовного аспекту. Особливістю дослідження є поєднання трансформерних моделей (DistilBERT, XLM-RoBERTa) з класичними рекурентними (BiLSTM) та згортковими (CNN) архітектурами, що дало змогу комплексно оцінити їх здатність розпізнавати емоційні патерни в текстах різними мовами. Кросмовна оцінка (train EN – test UA) дозволила визначити вплив машинного перекладу на збереження семантичних та емоційних ознак тексту, а також виявити моделі, здатні найкраще узагальнювати знання між мовними просторами. Таким чином, робота робить внесок у розвиток підходів до емоційного аналізу текстів у багатомовному середовищі та сприяє формуванню більш універсальних і пояснюваних моделей для NLP-завдань.

Висновки. Проведене дослідження показало, що ефективність моделей для класифікації емоцій суттєво залежить від їхньої архітектури та мовних особливостей навчальних і тестових вибірок. Серед розглянутих моделей базова TF-IDF + Logistic Regression продемонструвала найнижчі результати (Macro F1 = 0.694 при train EN/test EN), що очікувано, оскільки вона не використовує глибинні контекстні зв'язки між словами. Нейронні мережі BiLSTM та CNN показали значно кращу узагальнювальну здатність, однак поступилися трансформерним моделям через обмеження в обробці довготривалих залежностей. Моделі на основі трансформерів (DistilBERT та RoBERTa) продемонстрували високу точність і стабільність. Гібридна модель (XLM-RoBERTa + BiLSTM) показала найкращі результати серед усіх експериментів - Macro F1 0.9058 для англомовного корпусу та 0.7942 для україномовного. Такий результат пояснюється поєднанням сильних сторін обох архітектур: контекстного представлення трансформера і здатності BiLSTM моделювати послідовні залежності. Загалом експерименти підтвердили, що трансформерні моделі, особливо у гібридних конфігураціях, забезпечують найвищу якість класифікації емоцій у тексті. Водночас простіші моделі, як TF-IDF + LR, можуть бути корисними для швидких базових оцінок або роботи з обмеженими ресурсами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hugging Face. (2025). Transformers Documentation. URL: https://huggingface.co/docs/transformers (Дата звернення: 05.11.2025)
2. Scikit-learn. (2025). User Guide & API Reference. URL: https://scikit-learn.org/stable/ (Дата звернення: 06.11.2025)
3. Kim, Y. (2014). Convolutional Neural Networks for Sentence Classification. DOI: 10.48550/arXiv.1408.5882\
4. Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N. (2020). Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale (XLM-R). DOI: 10.18653/v1/2020.acl-main.747
5. Google Developers. Classification: Accuracy, precision, recall, and related metrics. URL: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/accuracy-precision-recall (Дата звернення: 06.11.2025)
6. Ribeiro, M. T., Singh, S., Guestrin, C. (2016). "Why Should I Trust You?": Explaining Predictions of Any Classifier. DOI: 10.1145/2939672.2939778

UDC 004.9:004.77

O.V. Holinko[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SMART CONTRACTS IN BLOCKCHAIN TECHNOLOGY ARCHITECTURE: TECHNICAL PRINCIPLES, ADVANTAGES, AND AREAS OF DEVELOPMENT

Abstract. The article examines the implementation of smart contracts as a modern tool for automating business processes based on blockchain technologies. The focus is placed on the technical foundations, operating principles, and specific features of "intelligent" agreements within decentralized digital environments. The concept of a smart contract is detailed as a software module capable of independently executing contractual terms without intermediaries. A comparative analysis of the most common platforms and programming languages used for the creation of smart contracts is presented, outlining the key advantages of their application in the corporate sector. Special attention is devoted to the challenges of integrating blockchain solutions into Ukrainian business activities and to assessing their potential impact on management efficiency, transparency of financial operations, and trust between contracting parties. Based on theoretical generalization, it is concluded that smart contract technology has significant prospects for practical use in the digital transformation of the national economy, contributing to greater security, productivity, and competitiveness of enterprises.

Keywords: *smart contract, blockchain technology, digital transformation, process automation, decentralized system, software, digital economy*.

Introduction. Global digitalization trends are fundamentally reshaping the way economic activities are organized and transforming the structure of business relations. Enterprises across various industries are actively adopting innovative technologies aimed at enhancing productivity, improving decision-making speed, and reducing costs. Among these tools, distributed ledger technologies occupy a special place, as they ensure transparency, reliability, and autonomy of transactions without the need for third-party control.

One of the most remarkable outcomes of this evolution is the smart contract - a programmed algorithm designed to automatically execute the terms of agreements within a decentralized blockchain network. Unlike traditional contracts that require supervision by lawyers or notaries, a smart contract performs obligations autonomously, relying on predetermined rules and cryptographic protection mechanisms. This reduces intermediaries, lowers transaction costs, and minimizes the risk of human error. The relevance of this research arises from the desire of Ukrainian enterprises to integrate into the global digital space and the need to develop technically and economically grounded mechanisms for optimizing business processes. In this context, studying the potential of smart contracts is not only scientifically significant but also practically necessary for building a modern management model [1].

Main Content. Distributed ledger technology (blockchain) is one of the most innovative architectural paradigms in modern computer science. This technology has demonstrated applications in various industries: financial systems, medical information

systems, legal platforms, and corporate applications. The key technical advantage is the ability to asynchronously exchange data with guaranteed integrity, which allows to minimize the latency of operations and optimize inter-component interaction in distributed systems. Blockchain is a specialized distributed data structure of the linked list type that operates in a peer-to-peer network of computer nodes. This architecture can be used to execute programmable transactions (smart contracts). The fundamental concept is based on the sequential linking of data blocks through cryptographic hash functions. Each block encapsulates a set of transactions or events. When a new block is formed, it contains a hash reference to the previous block, forming an immutable chain with the append-only property.

In a broader context, it is a distributed data management system that combines cryptographic algorithms, consensus protocols, and P2P architecture. The technology offers an alternative data processing model based on decentralization, fault tolerance, and cryptographic immutability. The fundamental difference from centralized systems is the distributed nature of data and management logic. Instead of a client-server architecture, a P2P model is used, where each node maintains a full replication of the database and participates in transaction validation through consensus algorithms (Proof of Work, Proof of Stake, Byzantine Fault Tolerance). System fault tolerance is a derived property of decentralized architecture. Data is replicated across multiple nodes, providing high availability. Even if N nodes fail (where N < the total number of nodes), the system continues to function thanks to the consensus protocol and state synchronization mechanisms [2].

Integration of blockchain technology allows for the creation of cryptographically secure systems. Combination with machine learning systems allows for the implementation of intelligent analysis of large volumes of data and automated decision-making under conditions of uncertainty. Business process automation is a strategic direction of enterprise systems development. It is based on the application of algorithmic solutions for processing repetitive tasks: document parsing, report generation, inventory management. This allows optimizing the use of computing resources and increasing system throughput.

The use of AI/ML and blockchain technologies allows for standardization of processes and reduction of the need for manual data processing. The real potential is revealed through smart contracts – programmable modules running on a blockchain platform. In 1994, Nick Szabo proposed the concept of self-executing contracts – programmable agreements that are automatically executed via an electronic decentralized ledger. However, the idea remained theoretical until 2008, when the advent of the Bitcoin blockchain created a practical infrastructure for implementation. Blockchain as a distributed ledger technology has opened up possibilities for deploying and executing programmable contracts. This has allowed us to move from concept to self-contained executable modules with guaranteed cryptographic security [3].

Table 1.

Technical advantages and limitations of blockchain systems

Advantages	Disadvantages
Decentralized architecture without a single point of failure	High computational complexity of consensus algorithms ($O(n^2)$ for BFT)
Cryptographic data immutability through hash chains	Limited throughput: 7-15 tps for Bitcoin, 15-30 tps for Ethereum
Transparency through a public distributed ledger	Potential data privacy issues on public blockchains
Automation through smart contract execution	Difficulty integrating with legacy systems through different protocols
Ability to create dApps (decentralized applications)	Lack of standardized APIs and legal frameworks
Auditing through immutable transaction log	Vulnerability to attacks on cryptographic primitives (quantum computers)
Reduced transaction costs due to the absence of intermediaries	The need for widespread adaptation to achieve network effects

Table 2.

Technical characteristics of smart contracts

Advantages	Disadvantages
Automation through programmable logic without trusted third parties	Vulnerability to logical errors and exploits in the code (reentrancy, overflow)
Execution determinism and guaranteed correctness	Limited error handling in case of unexpected system states
Transparency and verifiability of the execution process	Difficulty of integration with off-chain systems (Oracle problem)
Event-driven architecture with automatic triggering	High development cost due to the need for formal verification
Cryptographic state immutability via blockchain	Legal uncertainty regarding responsibility for implementation
Low latency compared to traditional systems	Privacy issues due to the publicity of transactions
Automatic audit trail through event logging	Limited scalability: gas limits and block size constraints

Smart contracts are software modules (bytecode or interpreted scripts) that run on blockchain platform virtual machines (EVM for Ethereum, WASM for modern blockchains). They provide:

- Determinism: the same input always produces the same result
- Verifiability: execution can be verified by any node
- Immutability: after deployment, the code cannot be changed
- Trustlessness: execution is guaranteed by a consensus protocol

Smart contracts reduce time-to-execution and transaction costs through automation. Execution is based on deterministic blockchain logic, which guarantees Byzantine fault tolerance and the absence of the possibility of external interference.

Financial systems: atomic execution of financial transactions (money transfers, dividend payments, settlements). DeFi protocols use the composability of smart contracts to create complex financial instruments.

Logistics systems and Supply Chain: automation of cargo tracking and tracing, automatic settlements between counterparties. IoT integration allows you to create event-driven systems. Real Estate: atomic buy-sell transactions, asset tokenization, automation of escrow services. Insurance: parametric insurance with automatic payouts based on Oracle data. The applications are unlimited: from DeFi and NFTs to digital rights management systems and decentralized autonomous organizations (DAOs).

Choosing a programming language for developing smart contracts is a strategic decision that determines the key characteristics of the final software product. This choice critically affects four main aspects of the system. First, it is performance, which includes gas efficiency and code execution speed. Gas optimization is especially important for Ethereum-based contracts, where each operation has a cost, and inefficient code can lead to prohibitively high transaction costs. Second, the security of the system depends on the language's resilience to vulnerabilities and the availability of formal verification capabilities. Some languages, such as Vyper, limit functionality specifically to increase security, excluding dangerous constructs such as recursion or infinite loops. Third, code maintainability is determined by the readability of the syntax and the availability of debugging tools, which is especially critical for the long-term evolution of the system. Fourth, the scalability of the architecture depends on the possibilities of contract composition and update patterns, which allow the system to adapt to new requirements without a complete redesign.

The most illustrative example of the practical application of smart contracts is the implementation of an asset exchange protocol. Such a smart contract demonstrates the capabilities of the technology by encapsulating complex business logic in a single executable module. The contract includes an asset availability validation mechanism that checks for sufficient balances and ownership rights before initiating the exchange. A critically important component is the implementation of atomic swap operations that guarantee that the exchange occurs in full or does not occur at all, excluding the possibility of partial execution, which could lead to the loss of assets by one of the parties. The payment processing module automates settlements between participants, including the calculation of commissions and the distribution of funds. The dispute resolution system is implemented through multi-signature schemes, where a transaction requires confirmations from several independent parties, which provides an additional level of security and trust. All this complex business logic is compiled into low-level bytecode and executed on the blockchain virtual machine, ensuring determinism and verifiability of each operation.

Table 3.

Comparison of programming languages for smart contracts

Programming language	Blockchain platform	Advantages	Disadvantages
Solidity	Ethereum (EVM)	• a broad ecosystem of libraries and frameworks; • a large developer community and documentation	• specific features of EVM (gas optimization, storage patterns)
Vyper	Ethereum (EVM)	• security due to functionality limitations (no recursion, no infinite loops)	• limited expressiveness compared to Solidity; • smaller tooling ecosystem
Michelson	Tezos	• formal verification capabilities; • stack-based architecture for security	• low level of abstraction; • steep learning curve
Chaincode (Go)	Hyperledger Fabric	• use of a general-purpose language; • mature Go ecosystem	• the need to understand Fabric-specific concepts (endorsement policies)
Cadence	Flow	• resource-oriented programming model; • built-in security through the type system	• low adoption due to platform specificity; • limited documentation

Smart contracts are software modules with clearly defined programmable logic and specific entry points, which are public functions. These functions form the external API of the contract, through which interaction with other contracts and external users is carried out. The activation conditions of smart contracts are diverse and flexible, which allows the implementation of complex automation scenarios. Time-based triggers ensure the execution of operations at a given point in time, using the blockchain timestamp as a reliable source of time, which is important for implementing deferred payments, token vesting, or automatic auction closing. Event-based triggers respond to blockchain events or callbacks from oracle services that provide external data to the blockchain, allowing contracts to respond to real-world events such as price changes, weather conditions, or sports scores. State-based triggers fire when a system reaches a certain state, such as when the balance reaches a critical level or when complex conditions with multiple state variables are met. Multi-signature triggers ensure execution only after receiving N confirmations from authorized addresses, which implements a distributed governance model and additional security for critical operations.

Smart contracts support a wide range of operations that shape their functionality. An asset transfer operation moves tokens or native cryptocurrency from one address to another via a low-level CALL opcode, which ensures atomicity of the operation at the virtual machine level. State preservation is implemented by writing data to a persistent blockchain storage, which is organized as a key-value store with an extremely high write cost, which incentivizes developers to optimize data structures and minimize

storage operations. Inter-contract interaction allows one contract to call the functions of another, creating composability - the ability to combine

Conclusions. A smart contract is a self-executing protocol that operates on a blockchain infrastructure and is based on programmable logic. It defines state transition rules and automatically ensures their execution through a consensus mechanism. After deployment, the contract becomes an autonomous module with guaranteed cryptographic security.

The implementation of smart contracts opens up opportunities for creating trustless systems that optimize interaction without centralized intermediaries. Use in an enterprise environment allows you to automate payment processing, quality control, logistics management, contract registry, ensuring high availability, transparency and security while minimizing operational overhead.

REFERENCES

1. Chikov, I. A., Koliadenko, S. V., Supryhan, V. A., Tabenska, O. I., & Nitsenko, V. S., Holinko O.V. (2023). Smart contracts and business process automation: The technical aspect. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, № 5.
2. Eggers, J., Bartmann, D., & Krcmar, H. (2021). Process automation on the blockchain: An exploratory case study on smart contracts. Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-54)
3. Diakiv, A. (2023). Prospects for the use of smart contracts to optimize business processes and public administration in Ukraine under martial law. Economic Analysis, 33(1), 212–221.

УДК 004.8: 005.8

В.В. Спірінцев[1], Б.О. Терновецький[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОСТАНОВКИ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАВДАННЯМИ В ІТ-КОМПАНІЇ ЗАСОБАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Антотація. В роботі розглянуто ключові аспекти щодо підвищення ефективності процесів постановки та управління завданнями в ІТ-компанії за рахунок використання технологій штучного інтелекту та процесної автоматизації. Проаналізовано типові вузькі місця на етапі переходу від бізнес-вимог до технічних задач: розпорошеність артефактів (Confluence/Figma/Jira), ручне дублювання описів, неоднорідність форматів, помилки атрибуції (проєкт, компоненти, виконавець, пріоритет), втрата контексту при передачі між ролями (бізнес аналітик (BA) → дизайнер → розробники). Запропоновано архітектуру інтелектуальної системи, що включає модуль NLP (Natural Language Processing) для семантичного аналізу вимог і генерації структурованих задач, оркестратор n8n для автоматичного створення епіків/сторі/підзадач у Jira та синхронізацію з Confluence, а також контур попереднього погодження UI через Figma Make. Сформовано методику оцінювання ефективності (час підготовки задач, повнота AC/DoD (Acceptance Criteria/ Definition of Done), точність маршрутизації виконавцям, кількість ітерацій погоджень). Очікуваний ефект: скорочення часу постановки на 30–50%, зростання повноти описів на 20–35%, підвищення прозорості та трасованості змін.

***Ключові слова**: штучний інтелект, NLP, оптимізація процесів, управління завданнями, автоматизація, n8n, Jira, Confluence, Figma Make.*

Вступ. У практиці розроблення програмного забезпечення критичною є швидкість і якість трансляції бізнес-вимог у технічні задачі. Переважно цей етап виконується вручну та включає численні ітерації між бізнес-аналітиком, дизайнером і командою розробки [1-3]. Результатом стають затримки, помилки в атрибутах задач, фрагментація знань і неоднорідність структури описів, що знижує передбачуваність планування та збільшує операційні витрати. Наявні інструменти керування проєктами (Jira, тощо) і документацією (Confluence) дозволяють стандартизувати артефакти, але без інтелектуальної обробки текстів вимог та оркестрації інтеграцій вони не усувають кореневих причин втрат. Сучасний рівень розвитку NLP і інтеграційних платформ надає можливість системно автоматизувати процес постановки задач: від аналізу тексту технічного завдання (ТЗ) і прототипів до формування повного набору задач із коректними зв’язками, атрибутами і критеріями приймання.

Постановка задачі. Мета роботи – розробити та обґрунтувати інтелектуальний підхід до оптимізації процесу постановки та управління завданнями в ІТ-компанії шляхом автоматизації аналізу вимог, генерації структурованих задач і їх маршрутизації виконавцям із використанням технологій штучного інтелекту та інтеграційних засобів.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначені наступні завдання дослідження:

- виконати аналіз поточного процесу постановки задач і ідентифікувати вузькі місця;
- спроєктувати цільову архітектуру рішення (NLP-модуль + n8n-оркестрація [4] + інтеграції Jira [5]/Confluence/Figma Make [6]);
- розробити нормалізований шаблон задач (Summary, Description з Context/Scope/UI/API/AC/DoD, атрибути, посилання);
- реалізувати прототип: парсинг вимог, витяг сутностей, класифікація задач, генерація описів, створення об'єктів у Jira, публікація зведеної таблиці в Confluence;
- запропонувати методику оцінювання (TPT (time-to-prepare tasks), AC completeness, routing accuracy, iteration count) і провести експерименти;
- узагальнити результати та сформувати рекомендації з упровадження і масштабування.

Об'єкт дослідження – процес організації, постановки та супроводу завдань у проєктній діяльності IT-компанії. Предмет дослідження – методи й програмні засоби інтелектуальної обробки текстових вимог і автоматизованої генерації/маршрутизації задач.

Основний зміст роботи. В роботі здійснено огляд інструментального ландшафту: Jira як система керування беклогом, Confluence як сховище вимог і артефактів, Figma Make для швидкого погодження прототипів, n8n як оркестратор процесів і інтеграцій.

На рис.1 наведено типову схему «As-Is» [7]: BA формує ТЗ у Confluence, на зустрічах із дизайнером уточнює макети, далі вручну створює в Jira епік/сторі/підзадачі, копіює частини описів, додає посилання і призначає виконавців. Виявлено наступні недоліки зазначеного підходу: у процесі виникають дублювання, несталість форматів, випадкові пропуски AC/DoD і помилки в атрибутах.

Запропонована в даній роботі архітектура «To-Be» (рис. 2) складається з чотирьох шарів [8-10].

1. Джерела: сторінки Confluence (структуровані розділи вимог), прототипи Figma Make (ідентифікатори фреймів/версій), додаткові артефакти (глосарії, доменні словники).
2. Інтелектуальний шар (NLP): парсер – уніфікує вхід до markdown/JSON; модуль витягу сутностей і зв'язків – визначає ролі, модулі, компоненти, платформи, залежності; класифікатор – розкладає елементи на типи (feature/bug/chore/research), виділяє епіки й сторі; генератор – формує «Description» із секціями Context/Scope/UI (посилання на конкретні фрейми)/API (контракти, ендпоїнти)/AC у форматі Given-When-Then/DoD (тести, локалізація, перформанс, безпека).
3. Оркестрація (n8n): тригери (оновлення сторінки в Confluence, позначка BA «готово до постановки», зміна версії прототипу), маршрутизація

(мапінг тегів і компонентів на Jira-проєкти і команди), створення епіків/сторі/підзадач через Jira REST API із коректними атрибутами та зв'язками, публікація згенерованої матриці задач у Confluence, логування/аудит.

4. Системи призначення: Jira стає єдиним джерелом правди щодо беклогу; Confluence містить та автоматично індексує таблиці відповідності «вимога → задачі → посилання на макети/ендпоїнти».

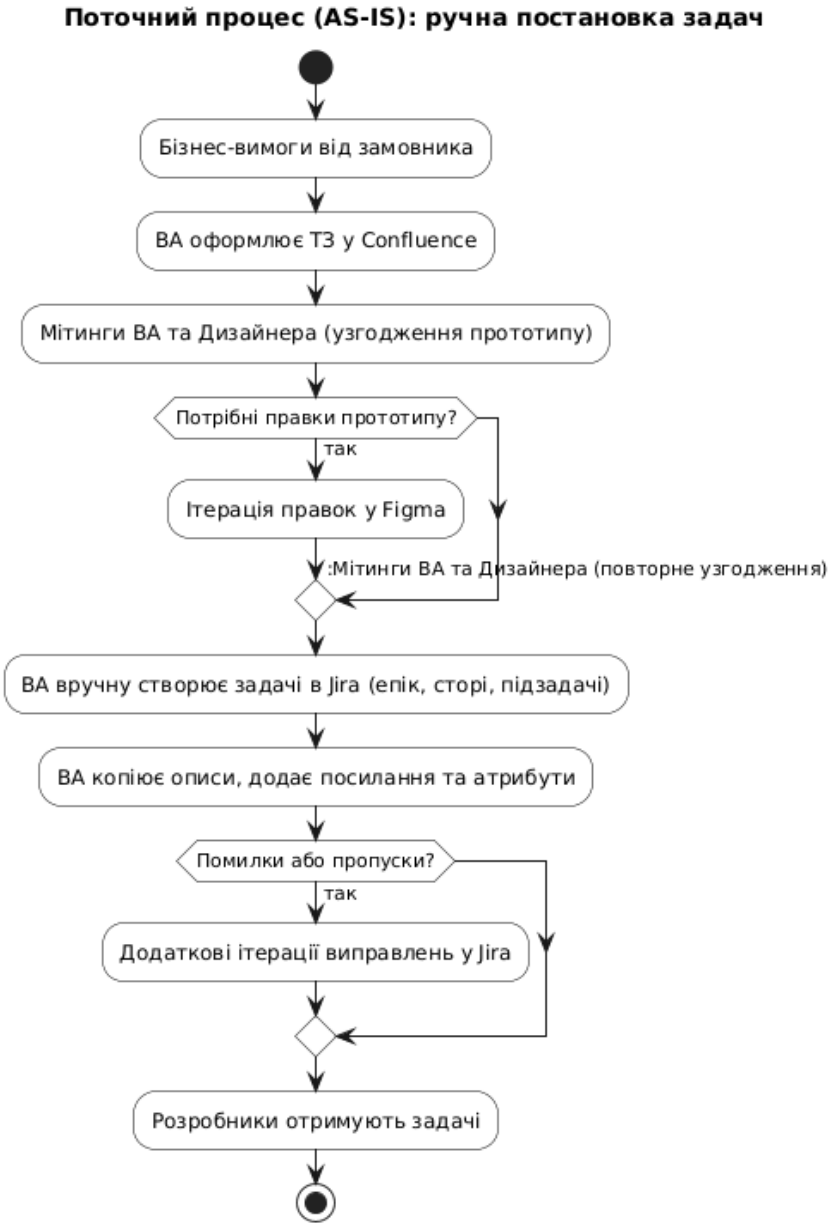


Рис. 1. Activity Diagram – "As-Is" (ручна постановка)

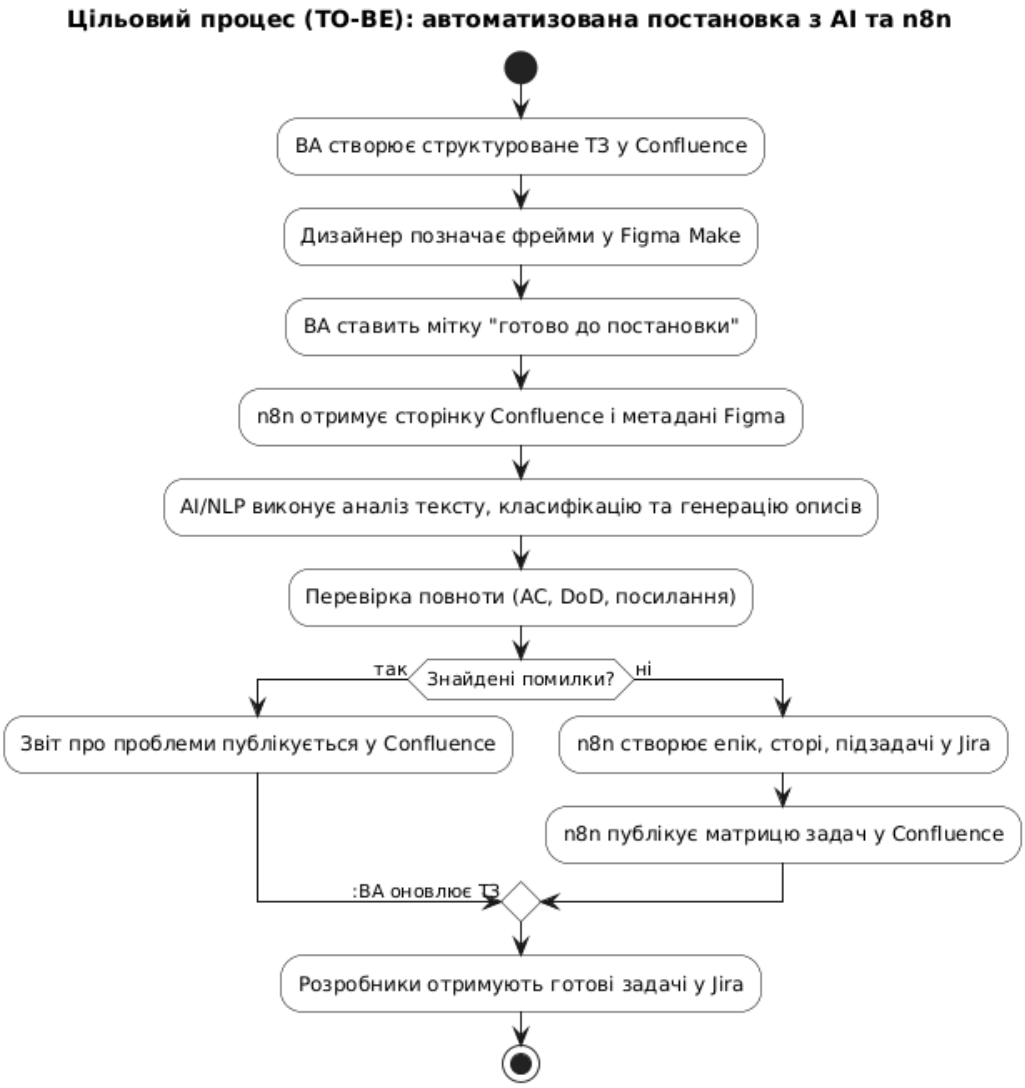


Рис. 2. Цільовий процес (To-Be): автоматизована постановка з AI + n8n

В роботі розроблено нормалізований шаблон задач:

- Summary використовує доменний префікс і короткий дескриптор (напр., INV-PDF: Додати QR у PDF-інвойс).
- Description має сталу структуру: Context (бізнес-фон), Scope/Out of Scope, UI/UX (фрейми, варіанти станів), API/BE (контракти, зміни схем), Acceptance Criteria (Given/When/Then), Definition of Done (покриття тестами, локалізація, лінт/перф, безпека).
- Attributes: проект, компонент, епік, пріоритет, виконавець/команда, залежності, мітки, середовище.
- Links: Confluence-сторінки, Figma-фрейми, пов’язані Jira-задачі.
- NLP-модуль заповнює шаблон автоматично, з можливістю ручного редагування BA перед публікацією.

Також в роботі запропоновано методику експериментального оцінювання. Формується набір із 10–15 фіч різної складності. Для кожної фічі виконуються

дві постановки: контрольна (ручна) і експериментальна (через систему). Вимірюються: TPT (час від «готового ТЗ» до появи повного набору задач), AC completeness (% задач із коректними AC/DoD), routing accuracy (точність призначення проєкту/команди/виконавця/компонента), iteration count (кількість повторних погоджень BA↔Design/Dev), defect leakage (дефекти, спричинені неповнотою постановки). Для зменшення впливу «ефекту навчання» команди виконують 2–3 ітерації, результати усереднюються; аналіз – за середніми/медіанами, довірчими інтервалами і якісним розбором відхилень.

Очікувані результати пілотного проєкту: скорочення TPT на 30–50% (залежно від складності і зрілості вимог), зростання AC completeness на 20–35% завдяки шаблонізації, routing accuracy 85–95% після первинного налаштування тегів і компонентів, зменшення середньої кількості погоджень на 1–2 ітерації на фічу, підвищення трасованості (посилання між Confluence/Figma/Jira створюються автоматично). Визначені операційні ризики: якість вхідних вимог, потреба в доменному глосарії, вимоги до доступів і безпеки, необхідність попереднього перегляду BA перед публікацією задач у Jira.

Наукова новизна. полягає у поєднанні семантичної обробки текстових вимог (NLP) з процесною оркестрацією інтеграцій (n8n) та автоматизованою генерацією нормалізованих задач у системі керування беклогом. На відміну від традиційних підходів шаблонізації або скриптового створення задач, запропонована модель:

- виконує витяг доменних сутностей і відносин із вільного тексту;
- формує структурований опис задач із AC/DoD у стандартизованому форматі;
- забезпечує трасованість «вимога → задачі → прототипи → реліз»;
- інтегрує дизайнерський контур погоджень у єдиний цикл постановки;
- надає формалізовану методику кількісного оцінювання ефекту (TPT, completeness, accuracy, iteration count). Така комбінація створює основу для подальшого доменно-орієнтованого навчання моделей на внутрішніх даних компанії.

Висновки. В роботі запропоновано і обґрунтовано інтелектуальний підхід до оптимізації процесу постановки та управління завданнями в IT-компанії. Рішення базується на NLP-аналізі текстових вимог, нормалізованих шаблонах задач, оркестрації інтеграцій через n8n та автоматичному створенні зв’язаних епіків/сторі/підзадач у Jira з публікацією зведеної інформації в Confluence і прив’язкою прототипів Figma Make. Розроблена методика оцінювання демонструє суттєве скорочення часу підготовки задач, підвищення повноти описів і точності маршрутизації, зменшення кількості ітерацій погоджень та покращення трасованості. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію моделей до доменних глосаріїв, розширення інтеграцій (CI/CD, тест-менеджмент, аналітика продукту), а також на формування політик контролю якості автоматично згенерованих постановок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sommerville I. *Software Engineering.* – 10th ed., Pearson, 2016.
2. Podeswa H. *The Business Analyst's Handbook.* – Course Technology, 2009.
3. ISO/IEC/IEEE 29148:2018. *Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering.*
4. n8n.io. *Workflow Automation Documentation.* – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.n8n.io
5. Atlassian. *Jira Software Documentation.* – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.atlassian.com/software/jira
6. Figma. *Prototyping & Developer Handoff.* – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.figma.com
7. Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice.* – Addison-Wesley, 2012.
8. Jurafsky D., Martin J. *Speech and Language Processing.* – Prentice Hall, 2023.
9. Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning.* – Springer, 2006.
10. Rubin K. S. *Essential Scrum.* – Addison-Wesley, 2012.

УДК 004.8:528.88

К.Л. Сергєєва[1], Д.Д. Чумичов[1], С.Л. Нікулін[1], О.О. Кавац[2], Ю.В. Кавац[2]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[2]Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДОЙМ ЗА ДАНИМИ SENTINEL-1 ТА SENTINEL-2

Анотація. Тривалі воєнні дії в Україні призвели до масштабного руйнування гідротехнічних споруд і водогосподарських систем, що ускладнює управління водними ресурсами. У роботі представлено інформаційну технологію картування і моніторингу зміни стану поверхневих водойм на основі нейромережевої класифікації супутникових зображень Sentinel-1 і Sentinel-2. Використання згорткової нейронної мережі (CNN) і блочної моделі з аналізом дисперсій та середніх значень ознак змішаних блоків з метою визначення домінуючого класу даних дозволило підвищити точність класифікації змішаних пікселів у мілководних зонах до 96%.

***Ключові слова**: інформаційна технологія, класифікація, згорткова нейронна мережа, блокова модель, Sentinel-1, Sentinel-2.*

Вступ. Поверхневі водні ресурси є критично важливими для функціонування суспільства та екосистем. В Україні вони зазнають забруднення й деградації через воєнні дії та неефективне управління, що зумовлює необхідність застосування сучасних інформаційних технологій для своєчасного моніторингу та підтримки прийняття управлінських рішень.

Унаслідок руйнування наземних станцій моніторингу під час бойових дій супутникові знімки стали основним джерелом інформації про стан поверхневих водойм. Водні об'єкти мають низьку відбивну здатність у видимому, ближньому

та короткохвильовому інфрачервоному діапазонах, що дозволяє чітко відокремлювати їх від інших типів поверхні за даними Sentinel-2 і спектральними індексами, такими як Normalised Difference Water Index (NDWI), Modified Normalised Difference Water Index (MNDWI), Automated Water Extraction Index (AWEI) та ін. [1].

Спостереження з радарних супутників (Synthetic Aperture Radar, SAR) дають змогу регулярно відстежувати динаміку змін водної поверхні незалежно від погодних умов. Радіолокаційний сигнал має низьке зворотне розсіювання (σ^0) на гладкій водній поверхні, тому водойми на зображеннях SAR виглядають темними, що дає змогу точно відокремлювати їх від суші навіть в умовах суцільної хмарності. Найпростіший підхід до картування поверхневих водойм ґрунтується на пороговій сегментації, коли клас «вода» визначають за додатними значеннями індексів NDWI або MNDWI на знімках Sentinel-2, а для SAR-даних – за значенням коефіцієнта зворотного розсіювання σ^0, що є нижчим за порогове значення, визначене, наприклад, за методом Оцу [2]. Найвищу точність забезпечують дані в поляризації VH, тоді як VV-поляризація є більш стабільною до варіацій порогу, однак у зонах заболочення й змішаних пікселів такі методи поступаються за точністю результату імовірнісним підходам і методам машинного навчання.

Методи машинного навчання та штучного інтелекту широко застосовуються для картування водних об’єктів. Зокрема згорткові нейронні мережі забезпечують високу точність за наявності репрезентативної навчальної вибірки [3]. Алгоритми, такі як дерева рішень, випадковий ліс, метод опорних векторів, регресійні та кластеризаційні моделі, використовуються для виявлення забруднення, прогнозування якості води та групування ділянок поверхневих водойм за подібністю стану.

Особливістю картування водної поверхні зруйнованих під час війни гідротехнічних споруд є наявність численних мілководних і заболочених ділянок, що створюють змішані пікселі на супутникових зображеннях і зумовлюють додаткові похибки класифікації, тому актуальною є проблема розробки нових інформаційних технологій, здатних коректно розділяти змішані класи.

Метою дослідження є розробка інформаційної технології картування поверхневих водойм з використанням методів нейромережевої класифікації, що забезпечують коректне розпізнавання пікселів класу «вода» у мілководних заболочених ділянках.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- розробити інформаційну технологію, що поєднує методи машинного навчання та статистичного аналізу для підвищення точності класифікації;
- створити та навчити згорткову нейронну мережу (CNN) для автоматизованого розпізнавання водних об’єктів;

- запропонувати блочну модель даних для коректного визначення змішаних пікселів у мілководних і заболочених ділянках;
- реалізувати програмний комплекс для оброблення, класифікації та візуалізації результатів моніторингу;
- провести порівняльну оцінку точності розробленої технології з традиційними методами (класифікацією на основі спектральних індексів за даними Sentinel-2, методом Оцу за даними Sentinel-1);
- проаналізувати динаміку змін площі водного дзеркала після руйнування греблі Каховської ГЕС.

Основний зміст роботи.

Досліджувана ділянка площею близько 8 тис. км² розташована на півдні України в межах Дніпропетровської, Херсонської та Запорізької областей і охоплює частину нижнього басейну Дніпра з його притоками, Білозерським лиманом, ставком-охолоджувачем ЗАЕС та зруйнованим Каховським водосховищем. Вибух греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року спричинив стрімке спорожнення водосховища, площа якого до катастрофи становила близько 2,2 тис. км², а рівень води знизився на 73%. Унаслідок руйнування утворилося до 8 великих та до 20 середніх і дрібних ізольованих водойм, а також було знищено системи зрошення та водопостачання на обох берегах Дніпра [4].

Для виявлення поверхневих водойм використано безхмарні знімки Sentinel-2 та Sentinel-1, отримані у близькі дати спостережень. Обрано три періоди: до руйнування греблі Каховської ГЕС, через два тижні та через рік після її руйнування, коли рівень води залишався відносно стабільним, що дозволило поєднати дані обох супутників із незначним часовим зсувом.

Супутникові дані Sentinel-2 L2A, отримано з порталу Copernicus Open Access Hub. Для аналізу використано канали B02 (490 нм), B03 (560 нм), B04 (665 нм), B05 (705 нм), B08 (842 нм) та B11 (1610 нм).

SAR-знімки Sentinel-1A GRD Interferometric Wide (IW) (Path 167, Descending, Frames 431 та 437) були перетворені у коефіцієнт зворотного розсіювання σ^0 і попередньо оброблені в ESA SNAP 8.0 (Apply Orbit File, Remove Thermal Noise, Remove Border Noise, Calibration, Speckle Filtering, Terrain Correction з Copernicus 30 m DEM, Linear-to-dB).

Виконана класифікація супутникових зображень з використанням згорткової нейронної мережі (CNN) з логістичною функцією активації, оптимізатором Adam та функцією втрат categorical cross-entropy. Архітектура мережі, що складалася з трьох згорткових шарів зі зменшенням розмірності та двох повнозв'язних шарів, виконана у середовищах Keras (Python) і ML.Net (C#).

Деякі ділянки супутникових знімків охоплюють заболочені території на дні зруйнованого Каховського водосховища. Їх пікселі можуть відповідати як воді, так і вологому ґрунту, що знижує точність бінарної класифікації. Для підвищення достовірності результатів запропоновано фізичну блочну модель даних, яка поділяє зображення на блоки, оцінює їх однорідність і визначає

належність кожного блоку до класу «вода» або «суходіл». Модель реалізує послідовність статистичних і просторових операцій, спрямованих на підвищення точності класифікації змішаних пікселів у межах зображення.

На першому етапі виконується аналіз середніх значень і стандартних відхилень коефіцієнту відбиття за даними Sentinel-2 та коефіцієнта зворотного розсіювання σ^0 за даними Sentinel-1 для обох класів. Це дає змогу визначити, який клас переважає в межах кожного блоку зображення та оцінити ступінь його однорідності.

Якщо блок виявляється неоднорідним, модель здійснює його поділ на підблоки для детальнішого аналізу, після чого кожен підблок класифікується повторно, що зменшує кількість хибних рішень.

На другому етапі проводиться аналіз сусідніх блоків у ковзному вікні, яке зміщується на половину розміру блоку, що дозволяє виявити просторові переходи між класами та покращити розмежування водойм. На цьому етапі визначаються блоки з переважанням певного класу, і для них обчислюються статистичні характеристики (середнє, стандартне відхилення) окремо для класів «вода» та «суходіл».

Отримані показники використовуються для уточнення належності спірних блоків і забезпечують можливість оцінки домінування певного класу, у тому числа на ділянках зі змішаними спектральними властивостями.

Складові розробленої інформаційної технології нейромережевої класифікації поверхневих водойм на основі супутникових даних Sentinel-1 і Sentinel-2 охоплюють кілька основних компонентів [5]:

A. Модуль моделювання (Modelling): реалізація та інтеграція моделей згорткових нейронних мереж, включно з параметрами навчання, функцією активації та оптимізатором.
B. Модуль обробки зображень (Image Processing): завантаження, попередня обробка (видалення шуму, калібрування, корекція рельєфу) та формування блочної структури даних із використанням бібліотеки OpenCV.
C. Модуль класифікації (Classification): застосування нейронних моделей для визначення ймовірності належності пікселів або блоків до класів «вода» та «суходіл» із подальшим збереженням результатів для статистичного аналізу.
D. Модуль статистичного аналізу (Statistics): обчислення середніх значень, стандартних відхилень і ймовірностей для обох класів, аналіз сусідніх блоків і уточнення результатів у межах змішаних ділянок.

Точність класифікації оцінювалася шляхом порівняння результату з еталонними бінарними растровими масками водних об’єктів. Для визначення якості моделі використовуються показники True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP) та False Negative (FN), а також індекс Жаккара (Intersection over Union, IoU), який обчислює ступінь подібності між отриманою та еталонною водними масками.

На рис. 1 наведено приклад класифікаційної похибки для одного з блоків зображення, у якому модель згорткової нейронної мережі оцінила імовірність належності до класу «суходіл» як 0,46, а до класу «вода» як 0,54.

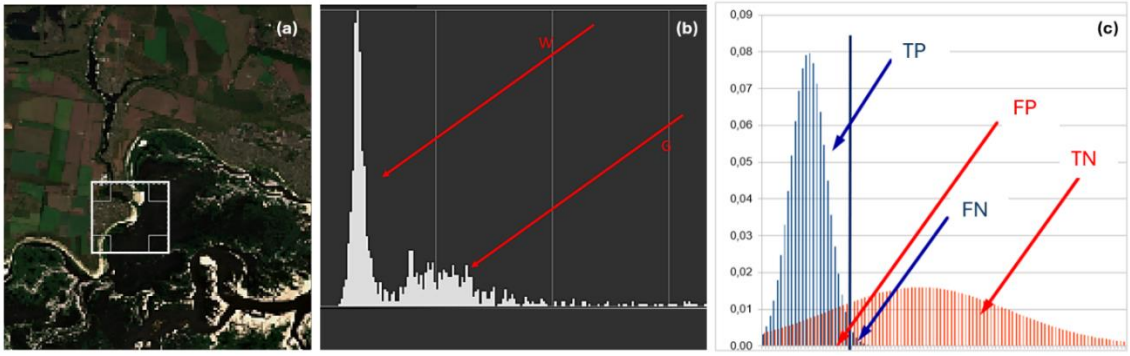


Рис. 1. Розподіл інтегрального індикатора в блоці зображення змішаних пікселів:
(а) білий колір позначає місце розташування аналізованого блоку зображення;
(б) бімодальна гістограма розподілу значень інтегрального індикатора;
(в) наближення гістограми за допомогою гауссового розподілу.
Базове зображення: Sentinel-2, 25 травня 2024 року.

Розподіл частот інтегрального показника має бімодальний характер: мода з низькими значеннями відповідає пікселям класу «вода» (W), а з високими – класу «суходіл» (G). Кожна з двох мод апроксимована гаусівським розподілом з середнім та стандартним відхиленням, визначеними емпірично для пікселів відповідних класів аналізованого фрагмента зображення:

$$f(I_w) = \frac{1}{\sigma_w\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(I_w - m_w)^2}{2\sigma_w^2}}, \qquad (1)$$

де I_w – пікселі класу «вода»,
m_w – середнє значення, визначене емпірично для пікселів класу «вода»,
σ_w – значення стандартного відхилення, визначене емпірично для пікселів класу «вода».

Якщо класи не перекриваються, поріг визначають методом Оцу за локальним мінімумом бімодальної гістограми. У разі їх перекриття порогове значення вибирають так, щоб мінімізувати похибку першого роду, дисперсію всередині класів «вода» і «суходіл» та максимізувати показник TP.

$$th_{\sigma^0} = argmin_{th_{\sigma^0} \in \Omega}(K(th_{\sigma^0})), \qquad (2)$$

де th_{σ^0} – поріг σ^0,
Ω – множина всіх допустимих значень порогу σ^0,
$K(th_{\sigma^0})$ – критерій вибору порогу.

Статистичний аналіз вибраного блоку зображення (рис. 1) показав високу ймовірність правильного виявлення водних площ (TP=0,99), низьку ймовірність помилки класифікації суходолу як води (FP=0,17) та пропуску водних ділянок (FN=0,01), що забезпечило точність IoU=0,846 і суттєво підвищило якість класифікації порівняно з початковою нейромережею.

Динаміку змін площі водної поверхні в межах досліджуваної території проаналізовано за багаточасовими супутниковими зображеннями Sentinel-1 та Sentinel-2 (рис. 2).

Як видно з рис. 2a, до руйнування греблі Каховської ГЕС площа водної поверхні була максимальною і становила близько 1,8 тис. км², що відповідає 23 % площі фрагмента зображення. До цієї зони входило Каховське водосховище та прилеглі водні об’єкти.

Після катастрофи (рис. 2b) у червні 2023 р. площа водної поверхні зменшилася більш ніж удвічі – до 11,2 % (приблизно 900 км²), а через рік, у травні 2024 р. (рис. 2c), скоротилася до 8,8 % (близько 700 км²).

Згідно з наземними спостереженнями, до руйнування греблі Каховське водосховище мало загальну площу близько 2155 км², довжину 230 км і максимальну ширину 25 км.

Після витоку води утворилося кілька десятків ізольованих водойм: фрагментоване русло Дніпра площею близько 120 км² й окремі мілководні водойми площею приблизно 307 км². Проте внаслідок випаровування, дренажу та відсутності притоку води їх площа продовжувала зменшуватись, що свідчить про незворотну деградацію водних екосистем у зоні колишнього водосховища.

Рис. 2. Різночасові маски поверхневих вод, створені з використанням запропонованої інформаційної технології: (а) до руйнування дамби Каховської ГЕС 3 та 6 травня 2023 року. Базове зображення: Sentinel-2 Natural Colour, отримане 6 травня 2023 року; (б) незабаром після руйнування дамби Каховської ГЕС 20 червня 2023 року. Базове зображення: Sentinel-2 Natural Colour від 20 червня 2023 року; (в) через рік після руйнування греблі Каховської ГЕС 21 і 25 травня 2024 року. Базове зображення: Sentinel-2 Natural Colour від 25 травня 2024 року.

Порівняльний аналіз результатів нейромережевої класифікації поверхневих водойм із традиційними методами порогової сегментації

проводився для трьох ділянок: охолоджувального ставка Запорізької атомної електростанції, Білозерського лиману та відрізка русла Дніпра на південь від міста Запоріжжя. Ці території було обрано через їх чітку візуалізацію на супутникових зображеннях в оптичному діапазоні електромагнітного спектру і відсутність змішаних пікселів, що дозволяє об'єктивно оцінити точність алгоритмів. Для дослідження використано дані Sentinel-1 (SAR) та Sentinel-2 (оптичні знімки) за 20 червня 2023 року безпосередньо після руйнування греблі Каховської ГЕС, коли водна поверхня зазнала суттєвих змін.

Еталонна маска водних об'єктів створена шляхом візуальної інтерпретації зображення Sentinel-2 у природних кольорах (Natural Colour), що забезпечило базу для подальшого порівняння результатів автоматичної класифікації. Як основний показник відповідності між еталонною та отриманими масками використано коефіцієнт перетину площ IoU, який характеризує ступінь збігу двох бінарних зображень.

Маска, побудована на основі NDWI-індексу за даними Sentinel-2, виявила основні поверхневі водойми, зокрема поверхню Білозерського лиману, охолоджувального ставка ЗАЕС і головного русла Дніпра. Проте аналіз показав, що клас «вода» частково включав пікселі відкритого ґрунту та штучних поверхонь, особливо в межах населених пунктів, а також мав значні прогалини у мілководних і заболочених зонах на дні зруйнованого Каховського водосховища. Отримана точність цього методу за показником IoU становила 0,876, що вказує на обмеження спектрального підходу за присутності змішаних пікселів.

Маска, побудована за методом Оцу для даних SAR Sentinel-1 у VV-поляризації з порогом σ^0 = -18,1 дБ, виявилася більш стійкою до змін освітлення і хмарності. Вона містить менше пропусків даних основних водних об'єктів і краще відображає дрібні затоки та прибережні ділянки. Водночас присутні артефакти у вигляді спекл-шуму на сільськогосподарських полях, схилах ярів і техногенних об'єктах ускладнювали інтерпретацію результатів. Значення IoU для цієї маски становило 0,843, що свідчить про добру, але не високоточну відповідність еталону.

Найкращі результати продемонструвала інформаційна технологія, розроблена в межах даного дослідження, яка базується на поєднанні згорткової нейронної мережі (CNN) з блочним статистичним аналізом зображень. Такий підхід дозволив мінімізувати кількість пропущених пікселів класу «вода» та скоротити помилки класифікації в межах заболочених і мілководних зон. На отриманих масках водна поверхня відображалася суцільно, без фрагментації, тоді як незначна кількість помилкових «водних» пікселів спостерігалася лише в прибережних районах.

За результатами оцінки, точність маски, сформованої за допомогою розробленого інструментарію, становила IoU = 0,961, що перевищує показники традиційних методів.

Наукова новизна полягає у розробці інформаційної технології нейромережевої класифікації поверхневих водойм на основі блочної моделі даних і статистичного аналізу розподілу класів, що забезпечує підвищення точності ідентифікації водних поверхонь у мілководних та заболочених зонах.

Висновки. Запропоновано інформаційну технологію картування поверхневих водойм за даними Sentinel-1 і Sentinel-2, яка базується на методах машинного навчання та блочній моделі даних, яка дозволяє аналізувати статистичні характеристики класів «вода» і «суходіл» у змішаних фрагментах зображень. Інформаційна технологія базується на інструментарії згорткових нейронних мереж і забезпечує точність картування поверхневих водойм точність IoU = 0,961, перевищуючи результати традиційних методів, і може бути адаптована для моніторингу водних ресурсів у різних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. M. A. Günen, U. H. Atasever Remote sensing and monitoring of water resources: A comparative study of different indices and thresholding methods / Science of The Total Environment – 926, 2024. – 172117.
2. Che L., Li S., Liu X. Improved surface water mapping using satellite remote sensing imagery based on optimization of the Otsu threshold and effective selection of remote-sensing water index / Journal of Hydrology – 654, 2025. – 132771.
3. Jahangeer J., Joshi P., Kapoor A., Tang Z. A review of AI-driven Google Earth Engine applications in surface water monitoring, assessment, and management / Discover Geoscience – 3(1), 2025. – 140 с.
4. O. Nepsha, S. Hryshko, L. Prokhorova, T. Zavialova, V. Lysenko Environmental Consequences of the Explosion of the Kahovsky Hydroelectric Plant on Biodiversity / Revista de la Universidad del Zulia – 15, 2024. – С. 163–178.
5. Sergieieva K., Kavats O., Vasyliev V., Kavats Y., Kovrov O. Machine learning-based monitoring of war-damaged water bodies in Ukraine using satellite images / CEUR Workshop Proceedings – Vol. 3790. – 2024. – С. 422–434.

УДК 004.056:004.94

Л.І. Мещеряков[1], М.М. Одновол[1], Н.П. Уланова[1], Є.О. Грушко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБРОБКА РОЗПОДІЛЕНИХ ТРАНЗАКЦІЙ В МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ

Анотація. Представлено аналітичний аналіз існуючих методів загальної організації даних та комунікації в мікросервісних системах. Розглянуто проблеми подвійного запису в гетерогенних мікросервісних системах, порівнюються існуючі методи вирішення цієї проблеми. Обґрунтовані програмні реалізації мікросервісних систем, враховуючи досліджені проблеми. Отримані результати є актуальними у проектуванні мікросервісних систем, які мають підтримувати узгоджений стан. Також надані результати дослідження є підставою для більш поглибленого вивчення проблеми ізоляції розподілених гетерогенних транзакцій.

Ключові слова: *мікросервісна архітектура, розподілені транзакції, ACID, BASE, оптимізація двофазних транзакцій, відмовостійкість, горизонтальне масштабування, асинхронна комунікація.*

Вступ. Розглядаються наступні три властивості розподіленої системи, на які посилається теорема CAP: узгодженість (C) означає, що всі клієнти бачать однакові дані одночасно, незалежно від способу їхнього запиту; доступність (A) означає, що всі компоненти системи повертатимуть коректну відповідь, навіть якщо вони не працюють. Це особливо важливо, якщо користувачі системи мають низьку стійкість до збоїв; стійкість до розподілення (P) означає, що система працюватиме навіть під час збою мережі, що призводить до втрати або затримки повідомлень між компонентами. Це стосується систем, які інтегруються з великою кількістю розподілених незалежних компонентів.

На жаль, неможливо мати всі ці властивості одночасно. Коли справа доходить до розподілених систем, таких як ті, що створюються за мікросервісною архітектурою. У своїй основі це говорить про те, що в розподіленій системі є три речі, які можливо порівнювати одна з одною: узгодженість, доступність та стійкість до розподілення. Зокрема, теорема CAP говорить, що можливо зберігати лише дві властивості при відмові.

Мікросервісна система, як правило, складається з кількох обмежених контекстів, і в кожному з них знаходяться дані, які не мають бути передані ззовні, а також дані, які використовуються зовні в інших обмежених контекстах. Кожен обмежений контекст має явний інтерфейс, де вирішується, якими моделями ділитися з іншими контекстами.

Зміни, які впроваджуються в систему, часто стосуються змін бізнес-логіки. Змінюються функціональні можливості, які доступні клієнтам. Якщо система розбита на обмежені контексти, які представляють домен, зміни, які треба впровадити, швидше за все, будуть ізольовані в межах одного мікросервісу. Це зменшує кількість місць, які потрібні для внесення змін, і дозволяє швидко

впроваджувати ці зміни. І якщо потрібно отримати інформацію з обмеженого контексту або зробити запити до функціональності в обмеженому контексті, важливо подумати про комунікацію між мікросервісами.

Постановка задачі. Створення горизонтально масштабованої та відмовостійкої архітектури мікросервісних систем, яка підтримує гарантії ACID та BASE для розподілених транзакцій в процесі збереження та обміну даними в мікросервісній архітектурі.

Основний зміст роботи. Перш ніж почати, варто зазначити, що жодна з існуючих технологій не є обов'язковою для обробки розподілених транзакцій в мікросервісній архітектурі. Будь-яка технологія може бути замінена на альтернативну, якщо цієї альтернативи буде достатньо для втілення потреб системи. Крім того, сама концепція мікросервісної архітектури дозволяє використовувати різні технології в різних мікросервісах в межах однієї системи.

Втім, станом на поточний момент, запропоновані технології є достатньо функціональними та гнучкими для застосування фактично в усіх можливих сценаріях, що пов'язані з мікросервісною архітектурою. Що також важливо, всі ці технології є одними з найбільш використовуваних у своїх нішах, мають відкритий сирцевий код, та доступні за безкоштовними ліцензіями.

Apache Kafka – є розподілене сховище подій і платформа для обробки потоків даних. Це система з відкритим кодом, розроблена Apache Software Foundation, написана на Java та Scala. Проект має на меті забезпечити уніфіковану високопродуктивну платформу з низькою затримкою для обробки потоків даних у реальному часі. Apache Kafka може підключатися до зовнішніх систем (для імпорту/експорту даних) через Kafka Connect і надає бібліотеки Kafka Streams для створення програм, що оброблюють потоки.

MongoDB – документо-орієнтована система управління базами даних (СУБД) з відкритим вихідним кодом, яка не потребує опису схеми таблиць. MongoDB займає нішу між швидкими і масштабованими системами, що оперують даними у форматі ключ/значення, і реляційними СУБД, функціональними і зручними у формуванні запитів.

PostgreSQL – є безкоштовна система управління реляційними базами даних (РСУБД) із відкритим вихідним кодом, яка наголошує на розширюваності та сумісності з SQL. Спочатку вона була названа POSTGRES, посилаючись на її походження як спадкоємця бази даних Ingres, розробленої в Каліфорнійському університеті в Берклі.

.NET (вимовляється як «дотнет»; раніше .NET Core) – це безкоштовна платформа з відкритим кодом для виконання програмного забезпечення для операційних систем Windows, Linux і macOS. Це кросплатформний наступник .NET Framework. Проект в основному розроблено співробітниками Microsoft за допомогою .NET Foundation,

Apache Kafka, MongoDB та PostgreSQL мають суттєво різні функціональні можливості, використовуються для різних завдань, але при цьому підтримують

дуже схожі моделі узгодженості, що робить їх інтеграцію простою та ефективною.

Apache Kafka та MongoDB здатні до теоретично необмеженого горизонтального масштабування, а PostgreSQL підтримує двофазні транзакції, що в свою чергу дозволяє виконувати розподілені транзакції між усіма трьома технологіями одночасно, використовуючи різні стратегії.

Використання .NET як універсального середовища виконання програмного коду дозволяє уникнути дублювання коду між різними мікросервісами, при цьому зберігається можливість використання різних мов програмування, хоча в цій роботі використовується лише мова C#. Також підтримується парадигма асинхронного програмування, що завдяки уникненню зайвого блокування на рівні операційної системи дозволяє значно знизити споживання серверних ресурсів для всіх програм, в основі яких лежить інтенсивна мережева взаємодія, в тому числі мікросервісів. При необхідності також дозволяється напряму викликати машинний код, що робить можливою інтеграцію з програмами, які не використовують .NET.

Забезпечення балансування навантаження та високої доступності виконавчого середовища за допомогою Apache Kafka. Цікавою функцією Apache Kafka є можливість забезпечити балансування навантаження під час обробки повідомлень [1]. Програму можна налаштувати з кількома екземплярами споживачів, при цьому кожен споживач отримує частину (частку) повідомлень на тему. Ця функція дозволяє системі масштабуватись у міру збільшення обсягу даних, що записуються в тему. Це також забезпечує високу доступність: якщо один із екземплярів споживачів виходить з ладу, повідомлення можна перенаправити до інших споживачів [2].

У Apache Kafka тема – це категорія або канал, до якого записуються записи. Тема подібна (хоча й дещо інша) до концепції черг, що використовується в інших системах обміну повідомленнями.

Кожна тема може містити один або кілька розділів. Розділ – це впорядкована послідовність записів, які лише додаються. Щоразу, коли запис записується в тему, він направляється до розділу в цій темі (рис. 1).

Щоразу, коли споживач підключається, він призначається до одного або кількох розділів. Повідомлення, отримані споживачем, надходитимуть лише з тих розділів, яким він призначений.

Балансування навантаження досягається шляхом призначення різних розділів різним споживачам. Наприклад, якщо тема містить 5 розділів, можливо мати 5 споживачів, які підключаються до кожного з них. Хоча цим призначенням, звичайно, можна керувати вручну, кращим підходом є використання груп Apache Kafka, щоб у разі збою споживача розділи, яким він був призначений, могли бути автоматично перерозподілені іншим споживачам.

Щоб забезпечити автоматичне призначення розділів споживачам, кожен екземпляр споживача може позначити себе як частину групи споживачів. Кілька

екземплярів споживачів можуть бути частиною однієї групи, інакше кажучи, група може містити одного або більше споживачів.

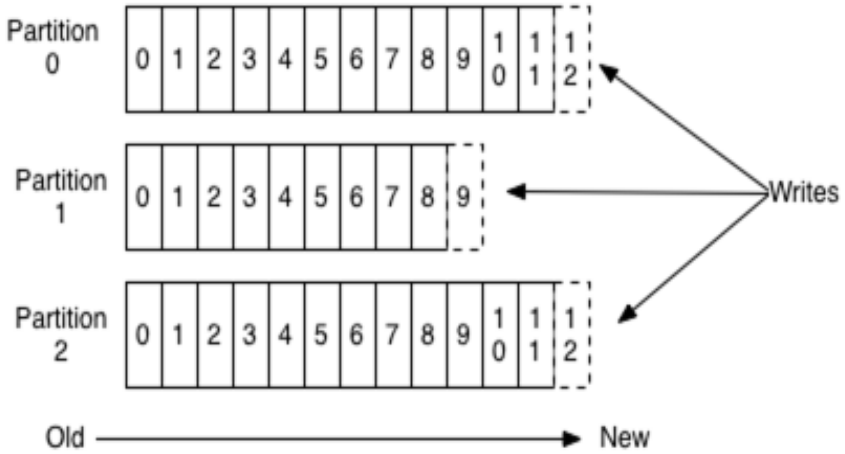


Рис. 1. Анатомія теми Apache Kafka

Коли споживач підписується на тему, група, до якої він входить, цьому споживачеві автоматично призначаються розділи теми. Якщо кілька споживачів в одній групі підписуються на ту саму тему, група призначить різні розділи для кожного споживача (рис. 2).

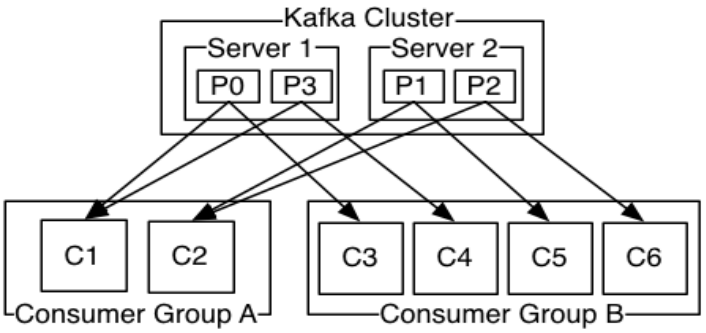


Рис. 2. Кластер Apache Kafka та дві групи споживачів

Гарантування одноразового виконання транзакції. Гарантія виконання принаймні один раз, яку надає Apache Kafka, означає, що точно буде отримано та оброблено кожне повідомлення, але повідомлення може бути отримано повторно в разі збою [3].

Є різні сценарії збою, які можуть призвести до неузгодженості. Наприклад, програма надсилає повідомлення в Apache Kafka. Програма ніколи не отримує відповіді, тому знову надсилає повідомлення (рис. 3). У цьому випадку, можливо, перше повідомлення було успішно збережено, але підтвердження було втрачено, тому повідомлення додано двічі.

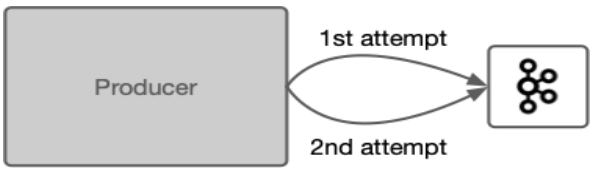


Рис. 3. Дуплікація при відмови

Або система обробляє великий файл, що містить події. Процес оброблює файл, надсилаючи повідомлення в Apache Kafka для кожної події. Після обробки половини файлу процес раптово падає та перезапускається. Процес знову починає обробляти файл із самого початку й позначає його як оброблений лише тоді, коли обробить весь файл. У цьому випадку події з першої половини файлу будуть надіслані в Apache Kafka двічі (рис. 4).

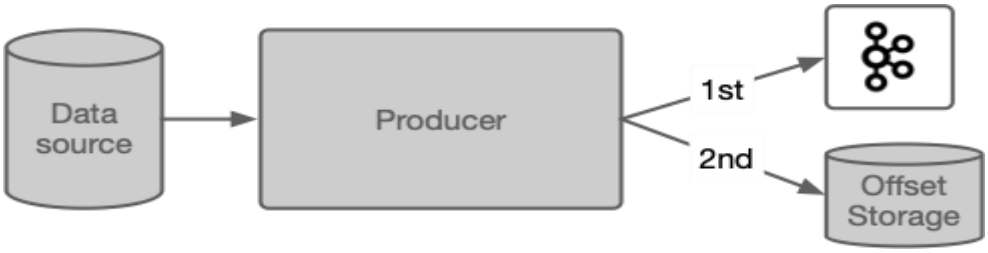


Рис. 4. Дуплікація через відсутність атомарності

Або споживач отримує повідомлення від Apache Kafka, перетворює їх і записує результати в базу даних. Споживач підтверджує обробку повідомлення лише після успішного запису результатів в базу даних (рис. 5). Якщо користувач зазнає помилки після запису у базу даних, але до підтвердження обробки повідомлення, він повторно обробить ті самі записи під час наступного запуску та збереже їх у базі даних ще раз.

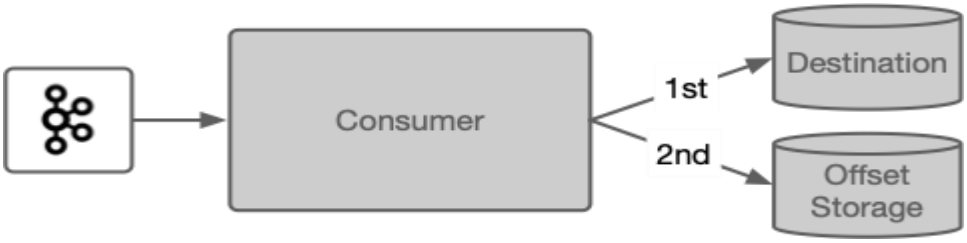


Рис. 5. Дуплікація даних при відмові сервера під час обробки повідомлення

Шаблон «Outbox» гарантує, що кожне повідомлення обробляється лише один раз за допомогою локальної транзакції бази даних, яка використовується для зберігання бізнес-даних. Алгоритм складається з двох фаз.

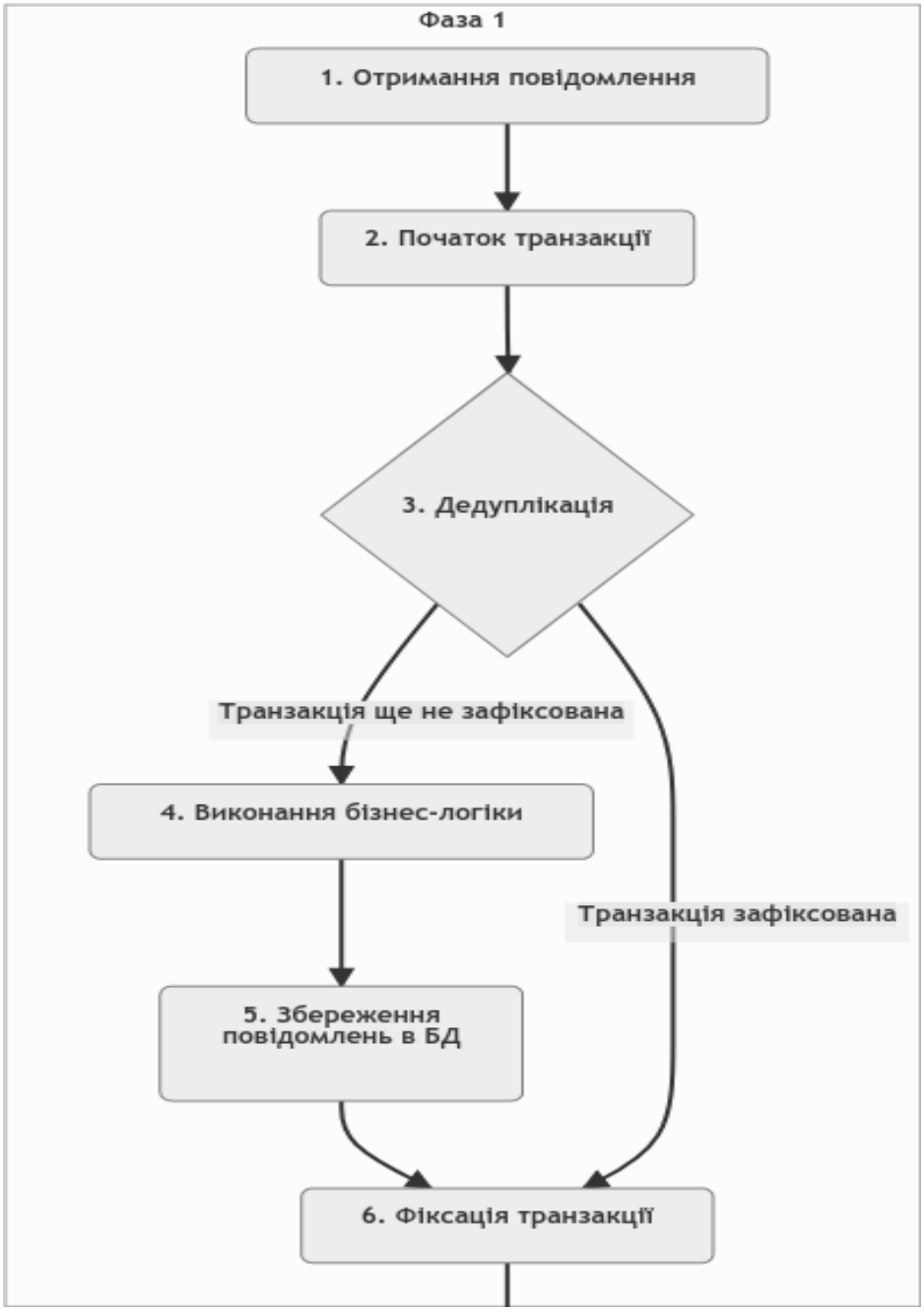


Рис. 6. Перша фаза «Outbox»

Алгоритм виконання першої фази «Outbox» (рис. 6):

1. Надходить вхідне повідомлення з Apache Kafka, але воно не підтверджується, щоб у разі невдачі повідомлення було доставлено знову.

2. Розпочинається транзакцію в базі даних.

3. Перевіряється таблиця Outbox в базі даних, щоб побачити, чи вхідне повідомлення вже оброблено. Це називається дедуплікацією. Якщо повідомлення вже оброблено, потрібно перейти до кроку 6. Якщо повідомлення ще не оброблено, потрібно перейти до кроку 4.

4. Виконується обробник повідомлень для вхідного повідомлення

5. Будь-які вихідні повідомлення не надсилаються негайно.

6. Будь-які вихідні повідомлення зберігаються в базі даних.

7. Транзакцію фіксується в базі даних. Це операція, яка забезпечує узгодженість між операціями обміну повідомленнями та базою даних.

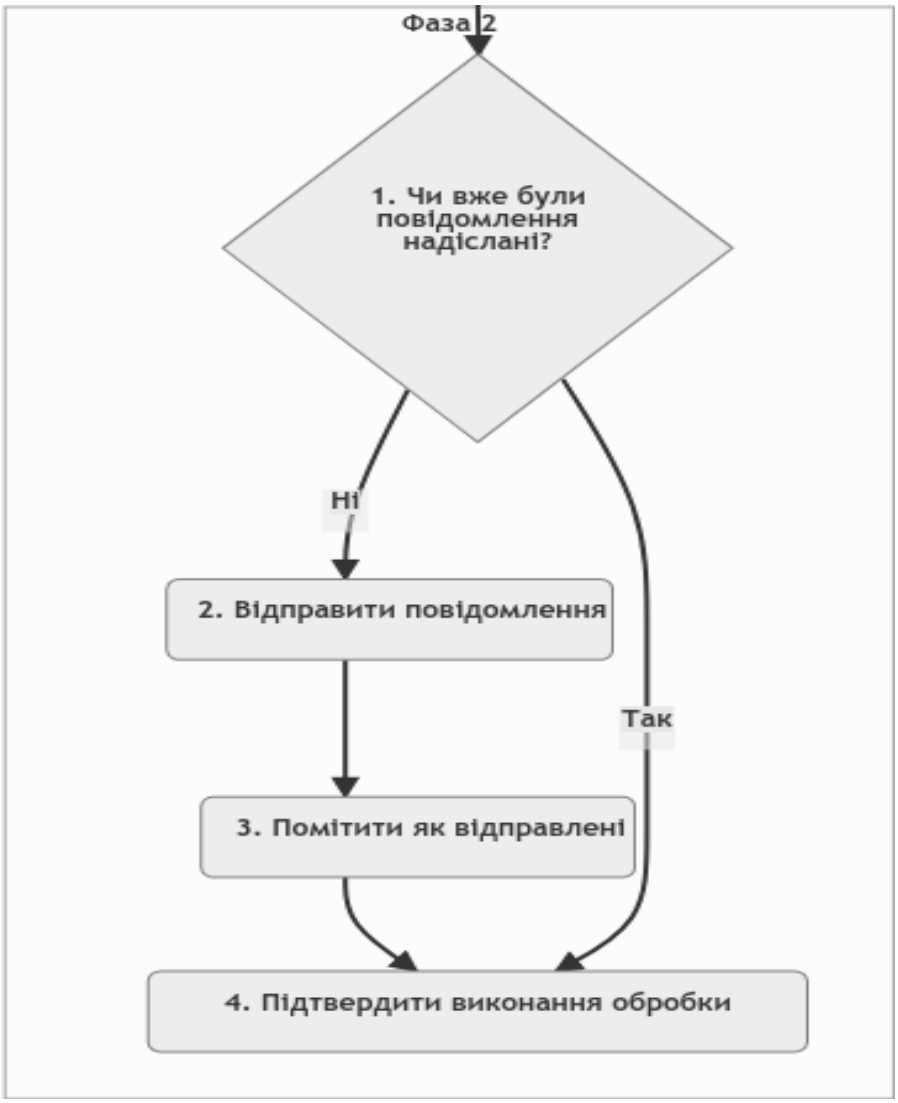


Рис. 7. Друга фаза «Outbox»

Алгоритм виконання другої фази «Outbox» (рис. 7):

1. Перевіряється, чи вихідні повідомлення вже надіслано. Якщо вихідні повідомлення вже надіслані, це означає, що вхідне повідомлення є дублікатом, тож потрібно перейти до кроку 4. Але якщо вихідні повідомлення ще не надіслано, потрібно перейти до кроку 2.

2. Відправляються вихідні повідомлення в чергу. Якщо на цьому етапі обробка не вдається, дублікати повідомлень можуть бути надіслані в чергу. Дублікати матимуть однаковий ідентифікатор повідомлення, тому їх буде дедупліковано за допомогою «Outbox» (фаза 1, крок 3) у кінцевій точці.

3. Оновлюється сховище «Outbox», фіксуючи факт публікації.

4. Вхідне повідомлення підтверджується (ACK).

В процесі виконання першої фази вихідні повідомлення не надсилаються. Вони серіалізуються та зберігаються в сховище «Outbox». Це відбувається в одній транзакції (кроки 2 – 6), яка також включає оновлення бізнес-даних, внесені обробниками повідомлень. Це гарантує, що зміни бізнес-даних не вносяться без запису вихідних повідомлень, і навпаки.

В процесі виконання другої фази вихідні повідомлення надсилаються до інфраструктури обміну повідомленнями, а сховище вихідних повідомлень «Outbox» оновлюється, щоб вказати, що вихідні повідомлення надіслано (кроки 1 – 3). Через можливість збоїв одне повідомлення може бути надіслано кілька разів. Наприклад, якщо на кроці 3 виникає збій (не вдалося оновити сховище вихідних повідомлень), повідомлення буде знову прочитано зі сховища вихідних повідомлень і надіслано знову. Поки приймальні кінцеві точки використовують «Outbox», ці дублікати дедуплікуються на 3 кроці.

Вихідні використовують лише ідентифікатор вхідного повідомлення як унікальний ключ для дедуплікації повідомлень. Якщо відправник не використовує «Outbox» під час надсилання повідомлень, він відповідає за те, щоб значення ідентифікатора повідомлення було узгодженим, коли це повідомлення надсилається кілька разів.

Розподілена ACID-транзакція в MongoDB та PostgreSQL. Транзакції ACID корисні для задоволення потреб розробників у складних сценаріях, які вимагають виконання «всього або нічого» під час роботи з узгодженими даними.

Коли програми працюють із величезними даними, потужності одного сервера з часом може стати недостатньо, оскільки клієнти перевантажують сервер одночасними операціями.

Шардінг – це механізм горизонтального масштабування шляхом розділення даних на частини, а потім розподілу їх між кількома серверами для підтримки великих наборів даних та підвищення продуктивності системи [4].

PostgreSQL реалізував шардінг поверх розділення даних на частини, дозволяючи розміщення будь-якого розділу розділеної таблиці на віддаленому сервері. Основою для цього є Foreign Data Wrapper (FDW), який протягом тривалого часу був частиною ядра PostgreSQL.

Двофазні транзакції PostgreSQL дозволяють базі даних зберігати деталі транзакції на диску без її фіксації. Це робиться шляхом виконання команди PREPARE TRANSACTION в кінці блоку транзакції. Для фіксації транзакції має бути виконана команда COMMIT PREPARED. Оскільки деталі транзакції зберігаються на диску за допомогою двофазних транзакцій, PostgreSQL може гарантувати можливість фіксації двофазної транзакцію пізніше, навіть якщо він виходить з ладу або не працює деякий час.

MongoDB вирішує питання керування великими колекціями безпосередньо через шардінг: у MongoDB немає поняття локального розділення колекцій. Насправді вся стратегія масштабування MongoDB базується на шардінгу, який займає центральне місце в архітектурі бази даних. Таким чином, процес шардінгу є максимально прозорим для програми: все, що повинен

зробити адміністратор бази даних, це визначити ключ сегмента. MongoDB надає можливість виконувати розподілені транзакції, які можуть охоплювати весь кластер MongoDB, та дозволяє встановлювати потрібний рівень узгодженості для кожної окремої транзакції [5].

Двофазні транзакції ніколи не потрібні для збереження даних в одне сховище. Але неможливо досягти атомарності з одними лише однофазними транзакціями, якщо потрібно писати дані в декілька сховищ.

MongoDB використовує двофазні транзакції у своїй реалізації розподілених транзакцій. Але, на відміну від PostgreSQL, не надає користувачам подібний до XA інтерфейс. Таке обмеження пов'язане в першу чергу з тим, що архітектурно та концептуально MongoDB не розрахований на довготривалі транзакції, тому що це потребує додаткового песимістичного блокування, тоді як двофазні транзакції теоретично можуть заблокувати дані навічно.

Завдяки семантиці Apache Kafka, можливо створювати операції, які оркеструють та поєднують в розподілені ACID-транзакції інші операції. Фактично, таким чином можливо отримати надійний, розподілений та відмовостійкий менеджер розподілених транзакцій.

Розподілені транзакції можна використовувати в межах кількох операцій, баз даних та шардів. Можливо обійти обмеження MongoDB на використання двофазних транзакцій, щоб використовувати MongoDB в межах двофазної розподіленої транзакції. Для цього потрібно використати описану оптимізацію розподілених транзакцій в гетерогенних системах, що дозволяє використовувати однофазну транзакцію для одного зі сховищ даних (MongoDB, в цьому випадку).

Варто зазначити, що MongoDB використовує консенсусну реплікацію. А оскільки оптимізація, яка дозволяє використовувати транзакцію MongoDB в межах розподіленої транзакції вимагає збереження помітки про фіксацію однофазної транзакції безпосередньо в MongoDB, треба бути обережним із обраним рівнем узгодженості операцій. Потрібно дочекатися фіксації однофазної транзакції консенсусом, перш ніж переходити до фіксації двофазних транзакцій. Відповідно, при відновленні після відмови стан однофазної транзакції повинен також бути узгоджений консенсусом.

Наукова новизна отриманих результатів визначається тим, що вперше розроблена оптимізація гетерогенних розподілених транзакцій, яка дозволяє ефективно поєднувати двофазні транзакції, однофазну транзакцію, та відправлення повідомлень, зберігаючи при цьому ACID та BASE гарантії.

Висновки. В цьому розділі був описаний приклад мікросервісної архітектури на основі асинхронної комунікації через брокер повідомлень. Мікросервіси, які побудовані за цією архітектурою, мають можливість в межах однієї операції атомарно працювати як з реляційними, так і з нереляційними даними, а також взаємодіяти з іншими мікросервісами.

Можуть бути використані різні методи вирішення проблеми подвійного запису для різних операцій, в залежності від того, який рівень узгодженості потрібен для окремої операції. Сувора узгодженість із застосуванням двофазних

транзакцій також доступна. Оптимізація двофазних транзакцій, а також використання шаблону «Outbox», дозволяє зробити подібні операції більш ефективними завдяки позбавленню одразу від 2 двофазних транзакцій.

Використання Apache Kafka в якості брокера повідомлень дозволяє контролювати ступінь паралелізму кожної окремої операції, а також зробити мікросервіси високодоступними завдяки балансуванню навантаження. Використання механізму дедуплікації повідомлень захищає систему від аномалій, які можуть виникати при розподілу мережі.

Семантика підтвердження оброки повідомлень, яку надає Apache Kafka, також дозволила створити специфічну оптимізацію шаблону «Outbox», яка не впливає на ефективність операцій сама по собі, але дозволяє спростити інфраструктуру, позбавивши систему від необхідності підтримки фонових процесів, таких як Debezium, що використовуються в класичних реалізаціях.

Загалом отримана архітектура є доволі простою, але дуже функціональною, оскільки фактично підтримує всі можливі стратегії розподілених транзакцій їх оптимізованих формах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. T. P. Raptis і A. Passarella On Efficiently Partitioning a Topic in Apache Kafka / T. P. Raptis і A. Passarella. - in 2022 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). - 2022. - с. 1–8.
2. D. Dedousis, N. Zacheilas, і V. Kalogeraki On the Fly Load Balancing to Address Hot Topics in Topic-Based Pub/Sub Systems / D. Dedousis, N. Zacheilas, і V. Kalogeraki. - in 2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). - 2018. - с. 76–86.
3. S. Bhola, R. Strom, S. Bagchi, Y. Zhao, і J. Auerbach Exactly-once delivery in a content-based publish-subscribe system / S. Bhola, R. Strom, S. Bagchi, Y. Zhao, і J. Auerbach. - in Proceedings International Conference on Dependable Systems and Networks. - 2002. - с. 7–16.

- in Distributed Computing, Berlin, Heidelberg. - 2014. - с. 361–375.

4. B. M. Abdelhafiz і M. Elhadef Sharding Database for Fault Tolerance and Scalability of Data / B. M. Abdelhafiz і M. Elhadef. - in 2021 2nd International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM). - 2021. - с. 17–24.
5. T. Panpaliya Benchmarking MongoDB multi-document transactions in a sharded cluster / , Master of Science, San Jose State University, San Jose, CA, USA, 2020.

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], С.М. Кочева[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВПЛИВ USER-ІНТЕРФЕЙСУ (UI) МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ НА КОРИСТУВАЦЬКИЙ ДОСВІД (UX) ДЛЯ РІЗНИХ ВІКОВИХ КАТЕГОРІЙ

Анотація. У статті розглянуто особливості впливу дизайну мобільних додатків на сприйняття користувачами різних вікових категорій. Проаналізовано візуальні уподобання дітей, підлітків, молоді та дорослих користувачів, а також людей старшого віку. Зроблено висновок щодо необхідності адаптації інтерфейсу під конкретну вікову аудиторію для підвищення ефективності взаємодії та задоволення користувачів.

Ключові слова: *дизайн, інтерфейс, мобільний додаток, користувачі, візуальне сприйняття, UX, UI, вікові особливості.*

Вступ. У сучасному світі мобільні додатки стали невід'ємною частиною повсякденного життя, охоплюючи широкий спектр функцій – від комунікації та розваг до освіти та фінансових операцій. З огляду на це, User Interface (UI) та User Experience (UX) мобільних додатків відіграють критично важливу роль у формуванні першого враження та подальшої взаємодії з користувачем. Ефективний дизайн не лише приваблює, але й утримує користувача, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле та приємне використання. Однак, візуальні елементи – кольори, шрифти, іконки, структура та інтерактивні компоненти – сприймаються по-різному залежно від віку користувача. Те, що приваблює дитину, може бути незрозумілим для підлітка, відштовхуючим для дорослого або незручним для людини похилого віку. [1]

Основний зміст роботи. Урахування вікових відмінностей є ключовим для створення успішних та привабливих застосунків, які відповідають потребам та очікуванням цільової аудиторії. Недооцінка вікових особливостей може призвести до низької залученості, швидкого відтоку користувачів та, як наслідок, до провалу продукту на ринку. Дизайн мобільних додатків впливає на сприйняття користувачами різних вікових категорій, тому необхідно адаптувати User Interface для кожної з них. У цій роботі наведено психологічні та когнітивні особливості основних вікових груп, а також найкращі практики UI/UX дизайну, що дозволяють створювати ефективні та привабливі мобільні рішення.

Дитячий вік (6–12 років). Дизайн, орієнтований на дитину (Child-centric design).

Дизайн мобільних додатків для дітей вимагає особливого підходу, оскільки ця аудиторія має унікальні когнітивні, моторні та емоційні особливості. Основна мета – створити середовище, яке є одночасно освітнім, розважальним та безпечним. Цей підхід ставить потреби дитини в центр процесу розробки. Важливо враховувати їхні когнітивні здібності (менш абстрактне мислення),

моторні навички (обмежена точність рухів), тривалість уваги (коротша) та емоційні реакції (більш інтенсивні).

Інтерфейс має бути максимально інтуїтивним та простим для розуміння. Використання яскравих, теплих кольорів (жовтий, блакитний, рожевий), декоративних елементів (мушлі, хвилі та ін.) створює відчуття гри та безтурботності. Такий дизайн викликає позитивні емоції та робить додаток зрозумілим і привабливим. Через розвиток моторних навичок, дітям потрібні великі інтерактивні елементи, які легко натискаються та області для взаємодії. Це зменшує фрустрацію та підвищує зручність використання. [1]

Діти потребують негайного підтвердження своїх дій. Анімації, звукові ефекти та візуальні підказки допомагають їм зрозуміти, що відбувається, та підтримують їхню залученість. Діти краще сприймають інформацію через зображення та аудіовізуальні засоби. Текст має бути мінімальним, великим та легко читабельним. Інтерфейс повинен бути чистим, без зайвих елементів, що можуть відволікати увагу дитини.

Приклад успішного дизайну для дитячої аудиторії наведено на рисунку 1. Дизайн вдало демонструє основні принципи дитячого UI/UX: яскравий пляжний фон створює ігрову атмосферу, а логотип "FELLOWS GAMES" із різнокольоровим шрифтом та маленькими іконками виглядає привабливо й відповідає інтересам дітей.

Підлітки та молодь (12–24 роки). Динамічні та яскраві інтерфейси.

Ця вікова категорія характеризується активним соціальним життям, прагненням до самовираження та високим рівнем володіння технологіями. Дизайн для підлітків та молоді повинен відображати їхню динамічність, креативність та бажання бути в тренді.

Підлітки орієнтуються на додатки, що нагадують популярні ігри (наприклад, Fortnite, Minecraft) або соціальні мережі. Використання контрастних кольорів, виразних елементів та сучасних шрифтів асоціюється з драйвом і креативністю. Можливість ділитися контентом, взаємодіяти з друзями та отримувати нагороди за активність є важливими факторами залучення. Елементи гейміфікації, такі як бали, рівні, досягнення, стимулюють використання додатку. [2]

Підлітки цінують персоналізацію та самовираження – можливість налаштовувати інтерфейс під свої вподобання, вибирати теми, аватари або створювати власний контент. Незважаючи на високий рівень володіння технологіями, підлітки часто мають менше терпіння та потребують швидкого доступу до потрібної інформації. Дизайн повинен бути інтуїтивно зрозумілим, з чіткою навігацією та мінімальною кількістю кроків для виконання завдань.

Приклад дизайну для підлітків та молоді наведено на рисунку 2. Приклад показує перехід від дитячої стилістики до естетики, що більше відповідає підліткам: темний динамічний фон створює зрілу атмосферу, логотип у сміливому помаранчевому стилі додає енергії, а зображення двох персонажів зі

зброєю підсилює асоціації з популярними іграми та відповідає інтересам молодіжної аудиторії.

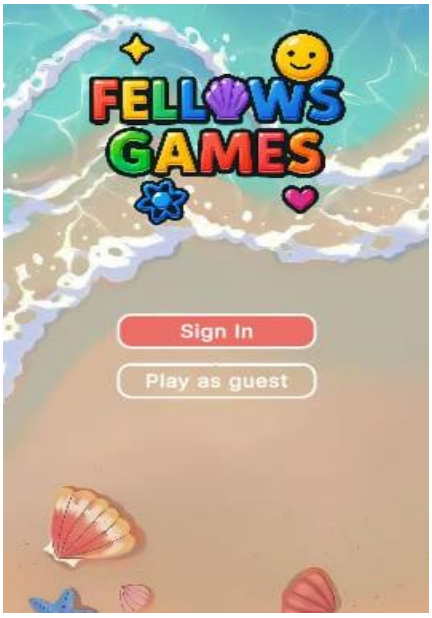


Рис. 1. Приклад дизайну для дитячої аудиторії

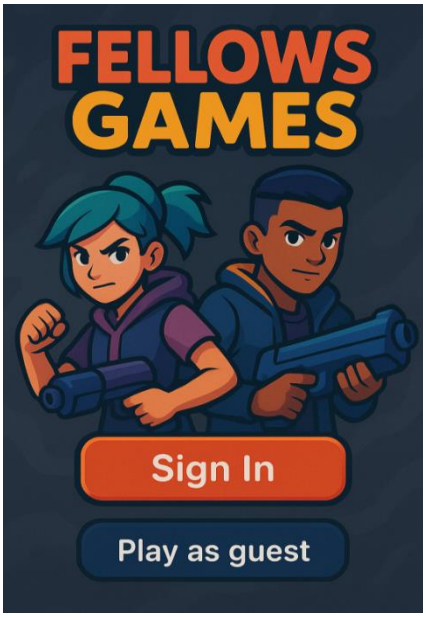


Рис. 2. Приклад дизайну для підлітків і молоді

Дорослі користувачі (25–49 років). Функціональні та ефективні інтерфейси. Ця вікова категорія, як правило, використовує додатки для роботи, фінансів, організації повсякденного життя та отримання інформації тому ці додатки повинні бути функціональні та надійні [3].

Перевага надається чистому, мінімалістичному інтерфейсу з нейтральними кольорами, простим шрифтом та чіткими кнопками. Такий дизайн створює атмосферу серйозності, професіоналізму та викликає довіру. Дорослі цінують додатки, які дозволяють швидко та ефективно виконувати завдання. Дизайн повинен бути орієнтований на функціональність, з логічною структурою та мінімальною кількістю відволікаючих елементів.

Чітка та інтуїтивно зрозуміла навігація є критично важливою. Користувачі повинні легко знаходити потрібні функції та інформацію без зайвих зусиль. Хоча це важливо для всіх вікових груп, для дорослих користувачів, які можуть мати певні особливості зору або моторики, доступність інтерфейсу є особливо актуальною.

Приклад дизайну для дорослих користувачів наведено на рисунку 3. Мінімалістичний пейзаж у приглушених холодних тонах створює відчуття спокою та професійності, що відповідає вподобанням дорослих користувачів. Логотип "FELLOWS GAMES" виконаний простим шрифтом без засічок у світло-сірому кольорі, а стримана типографіка підкреслює чіткість і лаконічність дизайну.

Люди старшого віку (50+ років). Читабельні та контрастні інтерфейси.

Дизайн для старшої аудиторії вимагає максимальної уваги до читабельності, простоти та доступності. Ця група користувачів може мати знижений зір, меншу точність моторних навичок та менший досвід взаємодії з сучасними технологіями.

Використання великих, легко читабельних шрифтів та високого контрасту між текстом і фоном є першочерговим. Можливість налаштування розміру шрифту в додатку є дуже бажаною. Кнопки, іконки та інші інтерактивні елементи для взаємодії повинні бути значно збільшені, щоб компенсувати можливе зниження точності моторних навичок. Навігація має бути максимально простою, з чіткими та зрозумілими ярликами. Треба уникати складних меню, прихованих функцій та перевантаження декоративними елементами. [4]

Дизайн повинен бути спрямований на мінімізацію когнітивного навантаження, з достатньою кількістю вільного простору між елементами. Це допомагає легше переглядати сторінку та зосереджуватися на важливій інформації.

Приклад дизайну для людей старшого віку наведено на рисунку 4. Землисто-зелений фон із простою ілюстрацією білки створює спокійний, ненав'язливий інтерфейс. Логотип "FELLOWS GAMES" у великому, чіткому шрифті без засічок та світло-жовто-зеленому контрастному кольорі забезпечує високу читабельність, важливу для старшої аудиторії.

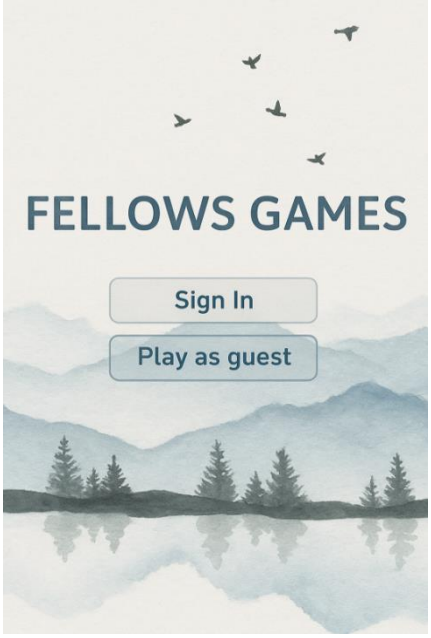


Рис. 3. Приклад дизайну для дорослих користувачів

Рис. 4. Приклад дизайну для людей старшого віку

Висновки. Можна стверджувати, що дизайн мобільних додатків повинен бути гнучким та адаптованим до вікових особливостей користувачів. Кожна вікова категорія має свої унікальні потреби, когнітивні здібності та візуальні уподобання, які необхідно враховувати для створення ефективного та

привабливого користувацького досвіду. Дитячі інтерфейси потребують яскравості, ігрових елементів та простоти, підліткові – динаміки, соціальної інтеграції та можливостей для самовираження, дорослі – мінімалізму, функціональності та надійності, а старші користувачі – максимальної читабельності, простоти та доступності. Урахування цих аспектів не лише підвищує ефективність взаємодії користувача з додатком, але й сприяє його довгостроковому успіху на ринку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Castella K. Designing for kids: creating for playing, learning, and growing. – Routledge, 2018.
2. Nielsen Norman Group. UX Design for Teenagers (Ages 13-17). [Електронний ресурс]. – URL: https://www.nngroup.com/reports/teenagers-on-the-web/ (дата звернення: 31.10.2025).
3. Cameron Chapman. Mobile UI/UX Design Principles: A Guide With Creative Ideas. Toptal Designers [Електронний ресурс]. – URL: https://www.toptal.com/designers/mobile-ui/mobile-ux-design-principles (дата звернення: 31.10.2025).
4. Mariia Kasym. How to Make the Older Users Love Your Product: Examples of UX Design for Seniors. Eleken Design Ltd [Електронний ресурс]. – URL: https://www.eleken.co/blog-posts/examples-of-ux-design-for-seniors (дата звернення: 31.10.2025).

УДК 004.75:519.876.5(045)

А.М. Битько[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН І ПРОБЛЕМИ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Анотація. Проведено аналіз моделювання технологій блокчейн. Показано, що велике поширення отримав модульний принцип побудови систем підвищеної ефективності. Відзначено, що вагомі досягнення у створенні багатопроцесорних обчислювальних систем відкривають нові можливості застосування паралельних обчислень до розв'язування складних багатовимірних задач.

Ключові слова: *блокчейн, розподілене моделювання, алгоритм, багатопроцесорні системи, хешрейт.*

Вступ. Блокчейн – це розподілена децентралізована база даних із криптографічним захистом, в якій кожна здійснена транзакція записується і стає відома усім учасникам мережі. Дані про здійснені транзакції зберігаються в певному порядку і формують незмінну послідовність пов'язаних блоків. Після цього інформація, що міститься у блоці, тиражується і копіюється на кожен вузол, що знаходиться в мережі. Цей алгоритм забезпечує стійкість цієї технології до зміни даних.

Блокчейн зазвичай управляється за допомогою однорангової (peer-to-peer) мережі. Після запису, дані у будь-якому блоці не можуть бути змінені без повної зміни усіх наступних блоків, що вимагає згоди більшості учасників мережі.

Основне завдання, для вирішення якого застосовується технологія блокчейн – узгодження дій учасників системи, об'єднаних однією метою, але позбавлених довіри один до одного.

Основний зміст роботи. Головна перевага базової технології Blockchain полягає у побудові єдиного ланцюга пов’язаних хешів. Вперше у всьому світі і вперше за весь час існування людства люди всюди можуть довіряти один одному і співпрацювати на рівних. Довіра не базується на авторитеті серйозних посередників, а на співпраці, криптографії і програмному коді [1 – 3]. Технологія Blockchain є розподіленою обліковою книгою записів про події у цифровому світі. Ключовою складовою Blockchain є журнал транзакцій, а самі транзакції – це єдиний спосіб змінити стан реєстру.

Для знаходження правильного хеша потрібно, щоб відповідні пристрої мали величезну обчислювальну здатність. При цьому основною особливістю завдання майнінгу полягає в максимальному розпаралелюванні обчислень. Для цього перші майнери почали широко використостовувати графічні процесори (*GPU*) із використанням додаткового програмного забезпечення, оскільки вони на той час мали колосальну обчислювальну потужність, що перевершує потужності процесора (у плані обчислення хеш-значень).

Популярність використання графічних процесорів свого часу привела до їх дефіциту. Виник дефіцит графічних процесорів через те, що попит на них формують не лише майнери, але і геймери. Компанії *NVIDIA* і *AMD* навіть анонсували спеціальні процесори для майнінгу Ethereum, щоб зупинити протистояння геймерів і майнерів. Проте помітимо, що через зростання потужностей і великих рахунків за електроенергію, такі пристрої втратили економічну доцільність.

Ці проблеми були вирішені за допомогою створення *ASIC*-майнерів. *ASIC* («Application Specific Integrated Circuit*»)* – інтегральна схема спеціального призначення для вирішення конкретного завдання. На відміну від звичайних інтегральних схем для загального призначення, спеціалізовані інтегральні схеми застосовуються в конкретному пристрої і виконують строго обмежені функції, характерні тільки для цього пристрою; внаслідок цього виконання функцій відбувається швидше і, кінець кінцем, дешевше.

Сучасні *ASIC* часто містять 32-бітовий або навіть 64-бітовий процесор, іноді у кількості декількох ядер, блоки пам'яті (як ПЗП, так і ОЗУ) і інші великі блоки. Такі *ASIC* часто називають однокристальною системою.

Незважаючи на популярність *ASIC,* він має низку недоліків. Одним з таких недоліків є те, що кожен окремий *ASIC*-пристрій створений під 1–2 алгоритми. *ASIC* не можна перепрофілювати під інші завдання. Ще одним недоліком є те, що ці пристрої специфічні і досить непросто знайти надійного дистриб'ютора. Таке устаткування необхідно замовляти і чекати, що воно прийде у справному

стані. Проте, *ASIC*-пристрої користуються дуже великою популярністю, а їх розробка йде досить активно.

В останні роки вимоги до обчислювальних можливостей під час визначення хешів значно зросли. Рис. 1 ілюструє ріст обчислювальної потужності bitcoin мережі. Тут EHash/s - 1018 хешів в секунду. Загальний огляд кривої росту обчислювальної потужності (хешрейту) мережі Bitcoin показано швидкість, з якою майнери здійснюють обчислення в мережі.

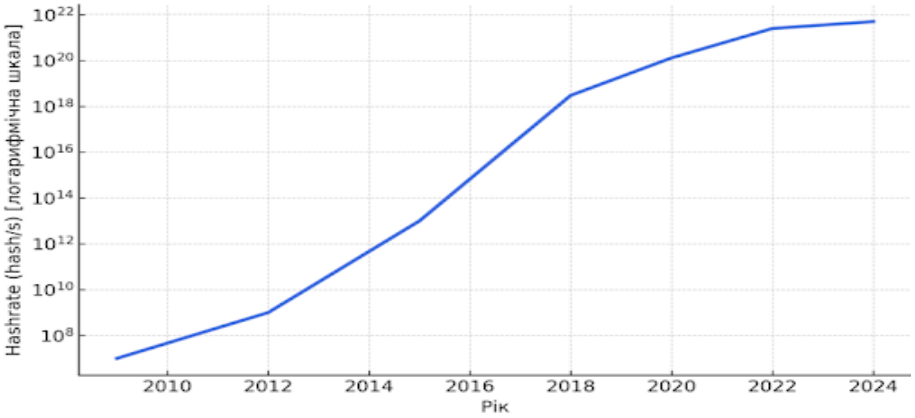


Рис. 1. Крива росту обчислювальної потужності (*hashrate*) *bitcoin* мережі

Наведений аналіз свідчить, що застосування обчислювальних засобів завжди залишалося основним чинником розвитку прогресу в інформаційних технологіях. При цьому існування проблеми підвищення ефективності обчислювальних ресурсів вже давно ні у кого не викликає ніяких сумнівів. У наш час її рішення лежить в двох площинах:

– по-перше, це створення систем великих інтегральних схем (СВІС), які працюють на надвисоких частотах з високою мірою конвеєризації;

– по-друге, розробка багатопроцесорних обчислювальних систем.

Перший спосіб передбачає суттєві капіталовкладення і не гарантує створення системи з надзвичайно високою ефективністю обчислень, про що свідчить досвід фірми *CRAY*.

Другий спосіб почав домінувати після оголошення в США так званої "Стратегічної суперкомп'ютерної ініціативи". Впродовж останніх років найбільші комп'ютерні компанії (*IBM, Intel, Compaq*) у рамках програми *ASCI* займаються розробкою високопаралельних обчислювальних систем на базі комерційно доступних процесорів. Тільки деякі фірми (*Hitachi, Fujitsu*) продовжують розробку векторних систем на базі інтегральних схем власного виробництва. Це свідчить про можливість обмежень ефективності систем комерційними процесорами, що пов'язано з особливостями технології СВІС.

Враховуючи наведені міркування, можна відмітити, що останнім часом став поширеним модульний принцип побудови систем підвищеної ефективності. Вагомі досягнення в створенні багатопроцесорних обчислювальних систем

відкривають нові можливості застосування паралельних обчислень до розв'язування складних багатовимірних задач [4].

Відзначимо, що паралельні обчислення, як перспективна (і приваблива) сфера застосування обчислювальної техніки, однозначно являє собою складну науково-технічну проблему. При цьому труднощі, що виникають під час розробки паралельних обчислювальних систем із заданими характеристиками, як правило, є первинними і вимагає глибокого дослідження [5]. Сучасна практика свідчить, що розподілене (паралельне) комп'ютерне моделювання може бути реалізоване із застосуванням усього спектру сучасної обчислювальної техніки: суперкомп'ютерів, кластерних обчислювальних систем, локальних і глобальних мереж тощо [6]. Крім того, за допомогою розподіленого моделювання можливо обробляти задачі, рішення яких потребує значних ресурсів процесорного часу та дає змогу інтегрувати математичні моделі до роботи на різних (і географічно віддалених) обчислювальних системах.

Висновки. Проведені дослідження показують, що одна з основних проблем технології, що вивчається, полягає в особливостях процесу моделювання. Як машинного, так і математичного. Так, показано, що як для обслуговування, так і рішення проблем захищеності необхідно застосовувати не просто потужні засоби обчислювальної техніки, а й високопродуктивні. Наведений аналіз свідчить, що застосування обчислювальних засобів завжди залишалося основним чинником розвитку прогресу в інформаційних технологіях. При цьому існування проблеми підвищення ефективності обчислювальних ресурсів вже давно ні у кого не викликає ніяких сумнівів і на сьогодні є актуальними. Більше того, показано, що найбільш перспективним підходом до збільшення швидкості і продуктивності обчислювальних засобів є паралельні обчислення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Melanie Swan. Blockchain: Blueprint for a New Economy. — O'Reilly Media, Inc., 2015. - 152 p. — ISBN 978-1-4919-2047-3.
2. Siraj Raval. Decentralized Applications: Harnessing Bitcoin's Blockchain Technology. — O'Reilly Media, Inc., 2016. – ISBN 978-1-4919-2454-9.
3. Аналіз застосування технології блокчейн в цілях забезпечення безпеки банківських операцій - https://otherreferats.allbest.ru/ (10.12.2018).
4. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Semenov S.G. Efficient parallelization algorithms of the applied tasks in multiprocessor computing systems. *Системні технології*. Дніпро. 2017. № 2 (109). P. 57 – 66.
5. Shvachych G., Moroz D., Mamuzić I. Maximum parallel algorithms for solving applied problems. *Metallurgy and related tropics* : *Proceedings of 15th international symposium of Croatian metallurgical society*. Zagreb, 22–23 March 2022. Zagreb, Croatia.
6. Shvachych G., Vozna N., Ivashchenko O., Bilyi O., Moroz D. Efficient algorithms for parallelizing tridiagonal systems of equations. *System technologies*. Dnipro. 2021. № 5 (136). P. 110 – 119.

УДК 004.8

І.С. Лактіонов[1], А.В. Візнюк[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ АГРОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ LLMs ТА RLVR

Анотація. Описано метод підвищення достовірності відповідей, згенерованих великою мовною моделлю, для прийняття агротехнічних рішень. Покращення досягається за рахунок використання алгоритму GRPO із запропонованою функцією винагороди, що враховує правильність відповіді й цитування лише релевантних документів.

***Ключові слова**: LLM, RAG, RLVR, GRPO, CoT, надійність, довіра, сільське господарство, підтримка прийняття рішень.*

Вступ. Інтеграція великих мовних моделей (LLMs) до систем підтримки прийняття рішень (DSSs) є одним із ключових напрямків досліджень для агротехнічного моніторингу [1]. Такі системи є критично важливими, оскільки вони можуть отримувати та аналізувати дані, наприклад, кліматичну інформацію з давачів, та використовувати LLMs для генерування рекомендацій щодо корегування режимів вирощування агрокультур. LLMs мають значний потенціал в DSS завдяки їхнім можливостям у розумінні тексту та генерування відповідей. Однак, одним із обмежень використання LLMs є «галюцинації», що проявляються в генеруванні правдоподібних, але фактично некоректних відповідей. Це відбувається через те, що LLMs спираються на внутрішню базу знань, яка може бути обмеженою або застарілою. В сільському господарстві такі помилки можуть призвести до неправильної діагностики хвороб рослин або невідповідних рекомендацій, що потенційно може спричинити економічні збитки чи шкоду навколишньому середовищу. Таким чином, підвищення достовірності прийняття агротехнічних рішень на основі LLMs є актуальною темою досліджень [1].

Мета досліджень полягає в удосконаленні інформаційних технологій підтримки агротехнічних рішень шляхом обґрунтування та застосування методу підвищення достовірності генерування рекомендацій на основі великих мовних моделей, що дозволить оптимізувати ресурси під час провадження сільськогосподарської діяльності рослинництва.

Основний зміст роботи. Одним із підходів до вирішення проблеми «галюцинацій» є retrieval-augmented generation (RAG) – метод, що поєднує пошук релевантної інформації з генеруванням відповідей на її основі, знижуючи ризик недостовірних результатів [1]. Також, одним із методів підвищення довіри до згенерованих результатів є підхід CoT (Chain-of-thought), який полягає в генеруванні спочатку ланцюга пояснень до розв’язку задачі, а вже потім генеруванні відповіді. Дослідження показали, що такий підхід дозволяє підвищити якість згенерованих результатів [2]. Останні досягнення в CoT

пояснень, особливо через алгоритм навчання з підкріпленням GRPO (Group Relative Policy Optimization) від DeepSeek [3], привели до сильної зацікавленості підходом RLVR (Reinforcement learning with verifiable rewards). Також, дослідження від Wen X. та ін. показало, що RLVR не тільки підвищує коректність відповідей, а й коректність ланцюгу пояснень CoT [4]. Huang J. запропонували підхід RAG-RL, що використовує алгоритм GRPO для покращення точності цитування [5]. Їхня функція винагороди за цитування базується на метриці Recall (повнота) і водночас штрафує модель за кожне неправильне посилання [5].

Запропонований підхід до генерування більш достовірних результатів полягає в підготовці набору даних із тестами по агрогалузі (наприклад, питання екзамену Certified Crop Adviser). Використання тестів у якості навчальних даних спрощує перевірку правильності відповіді, що дозволяє застосувати підхід RLVR. Процес також включає синтетичне генерування релевантних та нерелевантних документів для кожної відповіді (за допомогою інших LLM) та донавчання базової LLM із застосуванням алгоритму GRPO. Ключовою відмінністю від роботи [5] тут є обчислення винагороди за цитування як F1-score@k, що змушує модель одночасно вирішувати два завдання: не пропускати релевантні документи (високий $Recall@k$) і не додавати зайвих, невірних посилань (висока $Precision@k$), що забезпечує значно вищу якість та надійність цитування:

$$R_{total} = R_{formatting} \cdot R_{answer} \cdot R_{citation}, \quad (1)$$

$$R_{citation} = \frac{2 \cdot Precision@k \cdot Recall@k}{Precision@k + Recall@k}, \quad (2)$$

де $R_{formatting}$ дорівнює 1, якщо форматування правильне (розмірковування моделі в тегах <think></think>, а відповідь в тегах <answer></answer>), і 0 – якщо формат невірний; R_{answer} дорівнює 1, якщо модель обрала правильний варіант відповіді в тегах <answer></answer>, і 0 – якщо неправильний; $R_{citation}$ – винагорода за правильність цитування; $Recall@k$ – співвідношення кількості правильно процитованих документів до кількості всіх документів, що мають бути процитовані; $Precision@k$ – співвідношення кількості правильно процитованих документів до кількості всіх документів, що процитувала модель.

Наукова новизна: одержав подальшого розвитку метод прийняття агротехнічних рішень на основі великих мовних моделей за рахунок застосування алгоритму GRPO із обчисленням винагороди, що враховує не лише правильність відповіді, а й правильність процитованих релевантних джерел, для підвищення достовірності згенерованих відповідей.

Висновки. Аргументовано актуальність дослідження підвищення достовірності прийняття агротехнічних рішень на основі великих мовних моделей. Проаналізовано останні дослідження в RLVR та приклади його застосування в RAG системах для підвищення достовірності результатів.

Запропоновано метод підвищення достовірності відповідей, які згенеровано LLMs у складі систем підтримки прийняття агротехнічних рішень, за рахунок навчання з використанням алгоритму GRPO для підвищення правильності процитованих джерел.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Vizniuk A. et al. A Comprehensive Survey of Retrieval-Augmented Large Language Models for Decision Making in Agriculture: Unsolved Problems and Research Opportunities. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*. 2025, Vol. 15 (2). P. 115–146.
2. Wei J. et al. Chain-of-Thought prompting elicits reasoning in large language models. *ArXiv*. 2022. P. 1–43.
3. Guo D. et al. DeepSeek-R1: Incentivizing reasoning capability in LLMs via Reinforcement Learning. *ArXiv*. 2025. P. 1–22.
4. Wen X. et al. Reinforcement Learning with Verifiable Rewards Implicitly Incentivizes Correct Reasoning in Base LLMs. *ArXiv*. 2025. P. 1–31.
5. Huang J. et al. RAG-RL: Advancing Retrieval-Augmented Generation via RL and Curriculum Learning. *ArXiv*. 2025. P. 1–13.

УДК 004.415.3:681.6

Г.Г. Швачич[1], П.О. Щербина[1], О,В, Іванченко[1], В.О. Алімов[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АДМІНІСТРУВАННЯ ХМАРНИХ ОФІСНИХ СЕРВІСІВ В ІТ-ІНФРАСТРУКТУРІ ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. У роботі розглянуто теоретичні та практичні засади проєктування системи адміністрування хмарних офісних сервісів і принципи їх інтеграції в ІТ-інфраструктуру підприємства. Проаналізовано архітектурні моделі, методи синхронізації користувачів і засоби безпеки, які забезпечують ефективне управління цифровими ресурсами. Окрему увагу приділено проблемам інформаційної безпеки, резервного копіювання, моніторингу та управління доступом у хмарному середовищі. Підкреслено важливість комплексного підходу до впровадження, що поєднує технічні, організаційні та управлінські аспекти. Робота містить узагальнення сучасних досліджень і практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності адміністрування хмарних офісних рішень.

Ключові слова: *хмарні технології, офісні сервіси, адміністрування, інтеграція, ІТ-інфраструктура, інформаційна безпека, корпоративні системи*.

Вступ. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується інтенсивним переходом підприємств до використання хмарних сервісів у повсякденній діяльності. Цей процес охоплює не лише програмні рішення для офісної роботи, але й цілу систему адміністрування, управління доступом, безпеки та інтеграції сервісів у корпоративне середовище. Хмарні офісні платформи стали основою цифрової трансформації бізнесу, забезпечуючи

можливість безперервного доступу до інформації, спільної роботи та централізованого управління ресурсами.

Водночас широке впровадження таких систем вимагає належного проєктування архітектури, розроблення політик адміністрування та побудови інтегрованої IT-інфраструктури, здатної забезпечити стабільність, масштабованість та безпеку. Адміністрування хмарних офісних сервісів – це не лише технічний процес, а й стратегічна складова управління цифровими ресурсами підприємства, що визначає рівень ефективності його діяльності [1].

У цій роботі розглянуто теоретичні та практичні аспекти проєктування систем адміністрування хмарних офісних сервісів, принципи їх інтеграції до корпоративної інфраструктури, а також основні виклики, з якими стикаються підприємства під час впровадження таких рішень.

Постановка задачі. Хмарні офісні сервіси – це сукупність програмних засобів, які надаються користувачам через Інтернет за моделлю *Software as a Service (SaaS)*. До найпоширеніших рішень належать ***Microsoft 365, Google Workspace, Zoho Office Suite, OnlyOffice, Nextcloud Office*** тощо. Вони забезпечують створення, зберігання, редагування та спільне використання документів, проведення відеоконференцій, планування завдань і комунікацію між співробітниками.

Переваги хмарних офісних рішень полягають у можливості масштабування ресурсів, зниженні витрат на утримання IT-інфраструктури, спрощеному адмініструванні та високій доступності даних [2]. За прогнозами аналітичної компанії *Market Research Future*, глобальний ринок хмарних офісних сервісів зростатиме із середньорічним темпом понад 15% у період з 2022 до 2030 року [3]. Така динаміка свідчить про стійку тенденцію цифровізації корпоративного середовища.

Разом із тим, інтеграція хмарних офісних рішень вимагає комплексного підходу до побудови системи адміністрування, що включає моніторинг, управління доступом, безпекою, політиками конфіденційності та відповідності міжнародним стандартам.

Проєктування системи адміністрування хмарних офісних сервісів передбачає формування єдиного комплексу механізмів управління цифровими ресурсами підприємства. Основними завданнями цього процесу є:

Визначення вимог до функціональності.

– На початковому етапі здійснюється аналіз бізнес-процесів, обсягу даних, кількості користувачів та типів доступу. Важливо встановити, які сервіси необхідно інтегрувати – електронну пошту, календар, відеозв’язок, файлове сховище тощо.

Оцінка готовності IT-інфраструктури.

– Проводиться аудит існуючих систем, серверного обладнання, мережевих рішень, політик безпеки, наявності служби каталогів користувачів. Це дозволяє визначити, чи можливе впровадження повністю хмарного рішення, чи доцільніше використати гібридну модель [4].

Вибір архітектурної моделі.

– Сучасні підприємства можуть обирати між публічною, приватною або гібридною моделлю хмари. У гібридній архітектурі частина сервісів працює локально, а частина – у публічній хмарі, що дає змогу забезпечити баланс між безпекою та гнучкістю.

Проєктування політик адміністрування.

– Визначається структура ролей, прав доступу, способи аутентифікації та контролю. Особливу увагу приділяють реалізації мультифакторної автентифікації (MFA), шифруванню трафіку, аудитам дій користувачів і системному моніторингу.

Інтеграція механізмів резервного копіювання та відновлення.

– Незважаючи на високу надійність хмарних сервісів, підприємство повинно мати власні політики резервування даних, що забезпечують стійкість до збоїв і можливість швидкого відновлення після інцидентів.

Основний зміст роботи. Інтеграція хмарних офісних сервісів у внутрішню IT-інфраструктуру передбачає створення єдиного середовища для обміну даними, комунікації та управління ідентичностями користувачів. Цей процес включає технічні, організаційні та інформаційні аспекти.

З технічного боку, основним завданням є **синхронізація локальних облікових записів користувачів** із хмарною системою (наприклад, через Azure AD Connect або Google Directory Sync). Це дозволяє реалізувати механізм *єдиного входу (SSO)*, за якого співробітники використовують одну пару облікових даних для доступу до всіх сервісів.

Організаційний аспект полягає у **розподілі адміністративних ролей**. Адміністратор хмарної системи відповідає за налаштування та безпеку сервісів, адміністратор домену – за управління користувачами, а фахівець із безпеки – за аудит, політики доступу та реагування на інциденти [5].

Важливим елементом є також **інтеграція з корпоративними системами управління документами (*DMS*)**, *ERP*- та *CRM*-рішеннями, що дозволяє об’єднати всі бізнес-процеси у єдиному цифровому просторі.

Додаткову увагу приділяють **комунікаційній взаємодії** – налаштуванню пошти, календарів, командних чатів, спільного редагування документів. Застосування централізованої системи адміністрування дозволяє керувати доступом до цих інструментів, контролювати ліцензії, оптимізувати витрати та забезпечити відповідність корпоративним політикам.

Під час інтеграції хмарних офісних сервісів важливим завданням є гарантування конфіденційності, цілісності та доступності даних. Серед найпоширеніших ризиків виділяють:

– ***Несанкціонований доступ*** – спроби зламати облікові записи користувачів або обійти автентифікацію;

– ***Втрату або витік даних*** – унаслідок людської помилки, технічного збою чи зовнішнього втручання;

– ***Проблеми відповідності законодавству*** – зокрема щодо зберігання персональних даних;

– ***Надмірну залежність від провайдера хмарних послуг*** – ризик vendor lock-in.

Для мінімізації цих ризиків підприємства впроваджують багаторівневу систему безпеки, яка включає контроль доступу, моніторинг активності, регулярні аудити, системи попередження вторгнень і шифрування даних як у стані спокою, так і під час передавання [6].

Дослідження показують, що одним із ключових напрямів розвитку є **поєднання безпеки та сталого розвитку:** енергоефективність, «зелені» дата-центри та оптимізація ресурсів вважаються невід'ємними складовими сучасного корпоративного управління [7].

Практичні аспекти проєктування та впровадження. Під час практичного впровадження систем адміністрування хмарних сервісів застосовується етапний підхід. Спочатку формується пілотний проєкт, який охоплює обмежене коло користувачів і дозволяє перевірити працездатність рішень. На цьому етапі оцінюються продуктивність, безпека, сумісність і зручність інтеграції.

Далі виконується **масштабування** – поступове підключення всіх підрозділів, міграція даних, автоматизація створення облікових записів і застосування політик. Важливо забезпечити **підготовку персоналу**, адже ефективність роботи з хмарними сервісами залежить від компетентності користувачів.

Система адміністрування має підтримувати **автоматичне надання прав доступу** за ролями, централізоване керування ліцензіями, моніторинг навантаження, ведення журналів подій і формування аналітичних звітів. Особливо важливо впровадити систему оповіщень про аномальні дії, що може вказувати на потенційні загрози безпеці [8].

Сучасні підприємства також інтегрують рішення з **управління витратами (Cloud Cost Management)**, які дозволяють контролювати споживання ресурсів і оптимізувати бюджет. За даними *Gartner*, у 2023 році світові витрати на публічні хмарні сервіси перевищили 600 мільярдів доларів, що вимагає від компаній ефективних механізмів контролю [9].

Висновки. Проєктування та інтеграція системи адміністрування хмарних офісних сервісів є важливим етапом цифрової трансформації підприємства. Від правильної архітектури, безпеки, організації адміністрування та підготовки персоналу залежить ефективність усієї корпоративної IT-інфраструктури.

Комплексний підхід передбачає поєднання технічних, організаційних і управлінських рішень, що забезпечують безпеку, гнучкість і стійкість цифрових процесів. Хмарні офісні сервіси стають ключовим елементом сучасного корпоративного середовища, а їх ефективне адміністрування – запорукою стабільності бізнесу, конкурентоспроможності та інформаційної безпеки підприємства.

Успішна інтеграція можлива лише за умов стратегічного планування, належного технічного проєктування та постійного моніторингу. Перспективними напрямами розвитку є автоматизація адміністрування, застосування штучного інтелекту для моніторингу подій і прогнозування ризиків, а також створення єдиних систем корпоративної ідентичності на базі хмарних платформ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mazula D., Lamprecht C. Redefining Enterprise Cloud Technology Governance. ISACA Journal, Vol. 3, 2023. – Режим доступу: https://www.isaca.org/resources/isaca-journal/issues/2023/volume-3/redefining-enterprise-cloud-technology-governance
2. Orekhov S. E., Artamonov D. P., Ivanov S. A. Cloud Computing Technologies in Integrated Management Systems. Infocommunication Technologies, Vol. 18, No. 4, 2020, pp. 477-484. DOI:10.18469/ikt.2020.18.4.13.
3. Market Research Future. Cloud Office Services Market Estimated to Grow at a CAGR of 15% During 2022–2030. – Режим доступу: https://www.globenewswire.com/news-release/2023/03/24/2633806/0/en/Cloud-Office-Services-Market-Estimated-to-Grow-at-a-CAGR-of-15-During-2022-2030.html
4. Спірін О. М., Олексюк В. П., Касьян С. П., Антощук С. В. Deployment and Administration of the Cloud Platform Google Workspace for Education in an Institution of Higher Education. Information Technologies and Learning Tools, № 6(92), 2022, с. 125–140.
5. Kayembe J., Ben Guirat I., Muehlberg J. T. Exploring Privacy and Security as Drivers for Environmental Sustainability in Cloud-Based Office Solutions (Extended Abstract). arXiv preprint, 2024. — Режим доступу: https://arxiv.org/abs/2411.16340
6. The Information Security Problem in Hybrid Cloud Models. – 2025. – Режим доступу: https://arxiv.org/abs/2506.00426
7. TechSci Research. Cloud Office Services Market Expected to Grow with a CAGR of 10.89% through 2029. – 2025. – Режим доступу: https://www.techsciresearch.com/news/20310-cloud-office-services-market.html
8. Gartner. Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending to Reach Nearly $600 Billion in 2023. – 2023. – Режим доступу: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases
9. ISACA. Governance, Risk, and Compliance in the Cloud Era. – 2022. –Режим доступу: https://www.isaca.org/resources

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], А.Т. Харь[1], І.Ю. Лисиченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

FIGMA MAKE – ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ВЕБДИЗАЙНІ

Анотація. У межах вивчення дисципліни «Web-технології та Web-дизайн» було опановано нову функцію Figma Make. Це нова функція, яка поєднує штучний інтелект і дизайн. Вона дозволяє згенерувати робочий прототип вебсторінки або додатка, просто написавши текстовий опис. Працює ця функція на базі потужної штучної моделі Claude 3.7 Sonnet. У цій роботі розглянуто принцип дії функції Figma Make, її переваги та приклади використання.

Ключові слова: *Figma Make, дизайн, інструмент, штучний інтелект, інтерфейс.*

Вступ. Figma – один із найпопулярніших інструментів для створення інтерфейсів, який за останні роки перетворився на повноцінну платформу для дизайнерів, розробників та продуктових команд. У 2025 році компанія Figma презентувала нову функцію Figma Make (рис. 1), яка стала великим кроком у напрямку автоматизованого дизайну. Цей інструмент дозволяє створювати макети, прототипи та навіть готові сайти за допомогою текстових запитів, використовуючи можливості штучного інтелекту.

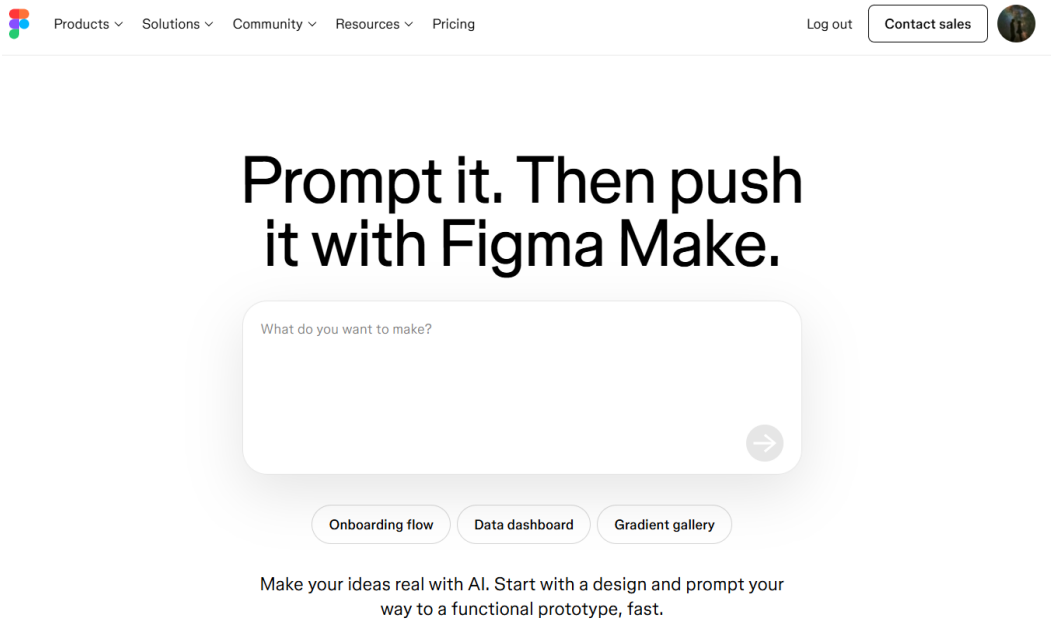


Рис. 1. Скріншот інтерфейсу Figma Make з офіційного сайту

Основний зміст роботи. Figma Make – це інструмент типу prompt-to-design, який дозволяє користувачеві створювати інтерфейс, просто описавши його словами. Наприклад, запит «створи головну сторінку для туристичного

сайту з банером, кнопкою та формою підписки» – генерує повноцінний макет із відповідними елементами. Інструмент працює на основі штучного інтелекту, який аналізує запит, підбирає компоненти з бібліотеки дизайну та формує візуальну структуру. Користувач може одразу редагувати результат, змінювати стилі, компонування та інтегрувати його в інші проєкти.

Figma Make тісно інтегрується з новими інструментами Figma Sites та Grid. Це дозволяє одразу публікувати створений макет як сайт, налаштовувати адаптивність та структуру сторінки. Таким чином, дизайнер отримує повний цикл – від ідеї до публікації – без потреби у сторонніх платформах типу Webflow або Tilda.

На рисунку 2 представлено результат роботи Figma Make – інтерфейс сайту про погоду, згенерований на основі текстового запиту.

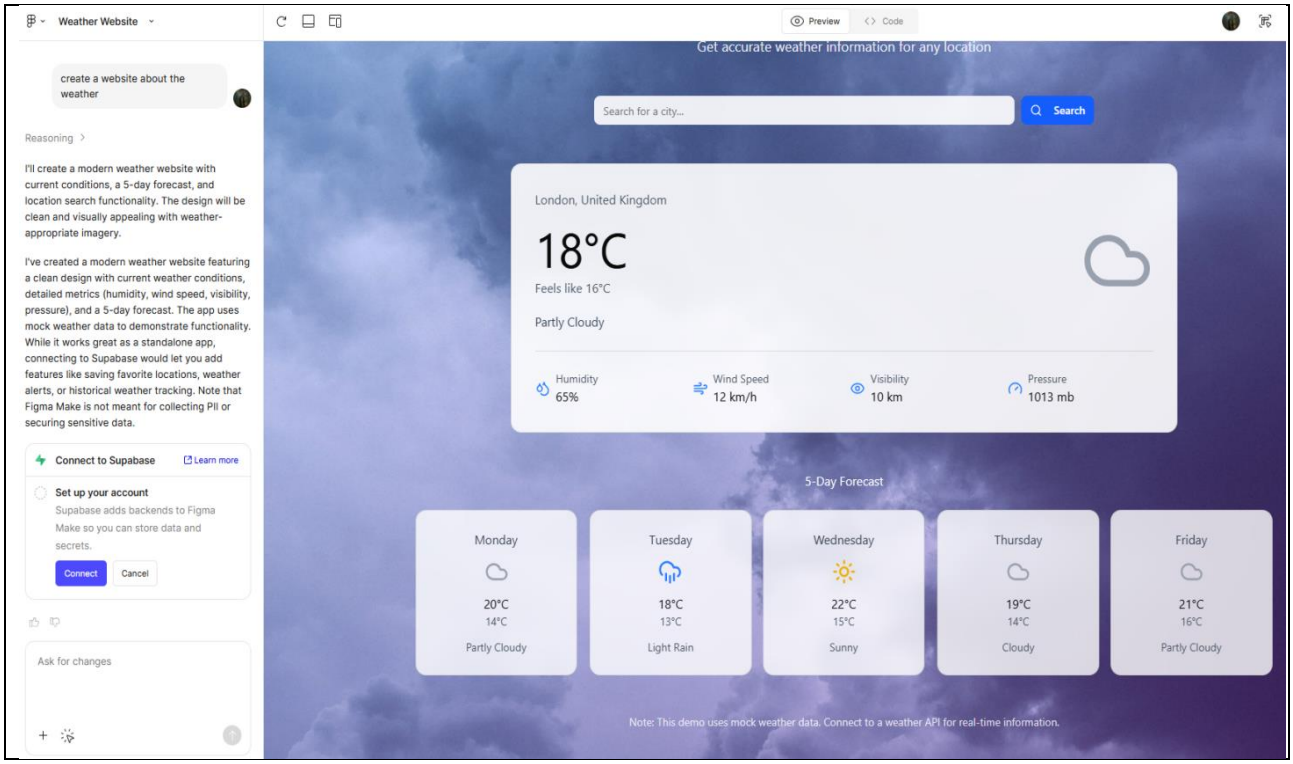


Рис. 2. Приклад запиту та результату генерації макету

Макет містить блок поточних погодних умов (температура, вітер, тиск, вологість), а також прогноз на 5 днів із графічними позначками стану погоди. Це демонструє, як Figma Make автоматично структурує контент, компоненти та стилі відповідно до запиту, створюючи повноцінний прототип без ручної верстки. При цьому одразу генерується адаптований інтерфейс для мобільних пристроїв і паралельно представляється код компонента, який можна інтегрувати в реальний проєкт (рис. 3).

Переваги використання Figma Make:

– швидкість (створення макету займає лічені хвилини);

– гнучкість (можливість редагування та налаштування результату);

– доступність (не потребує знань коду чи складних інструментів);

– інноваційність (використання AI для генерації дизайну – новий стандарт у UX/UI).

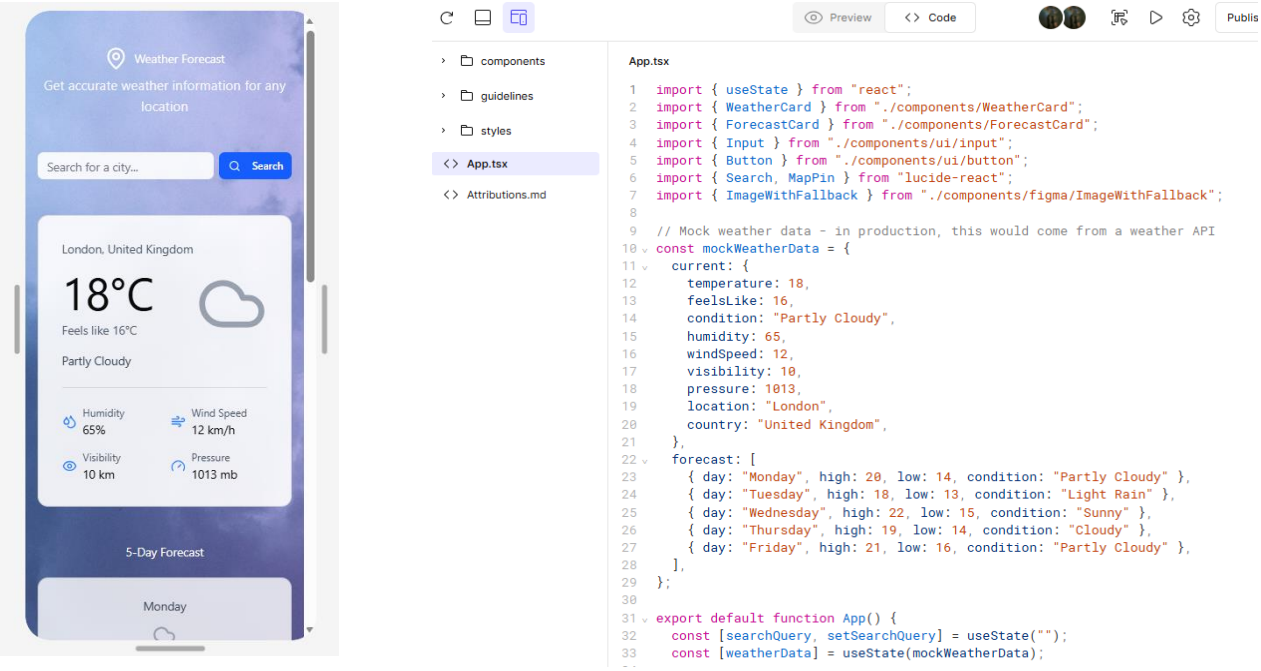


Рис. 3. Адаптований інтерфейс для мобільних пристроїв разом з кодом макету

Висновки. Figma Make – це новий етап у розвитку вебдизайну, який поєднує простоту, швидкість та інтелектуальність. Його використання дозволяє створювати якісні інтерфейси без глибоких технічних знань. У майбутньому очікується розширення функціоналу, зокрема підтримка української мови, глибша інтеграція з CMS та можливість експорту коду. Це робить Figma Make перспективним інструментом для освітніх і комерційних проєктів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Figma Make – офіційна сторінка. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.figma.com/make/ (дата звернення: 5.11.2025).
2. Dinozavrix. UXPUB: Новинки Figma Config 2025. [Електронний ресурс]. – URL: https://ux.pub/dinozavrix/novinki-figma-config-2025-oghliad-novikh-instrumientiv-make-sites-grid-draw-ta-buzz-4nfg (дата звернення: 5.11.2025).
3. Каміла Амескан. Оновлення Figma 2025. [Електронний ресурс]. – URL: https://kukurudza.com/blog/onovlennya-figma-2025/ (дата звернення: 5.11.2025).

УДК 004.415.3:681.6

Г.Г. Швачич[1], П.О. Щербина[1], А.А. Мартиненко[1], М.В. Горченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ CUDA

Анотація. У представленому дослідженні розглядається ефективність використання паралельних обчислень із застосуванням технології *CUDA* у контексті систем реального часу з розподіленими обчислювальними вузлами. Аналізується архітектура розподілених *GPU*-систем, їх взаємодія з CPU, накладні витрати на комунікацію, методи оптимізації та конкретні середовища виконання для гетерогенних систем із підтримкою *GPU*. Особлива увага приділяється проблемам систем реального часу, таким як забезпечення низької затримки та гарантованого часу відповіді, а також шляхам застосування *CUDA* у розподілених середовищах. Результати свідчать, що за умови належного архітектурного проектування та оптимізації розподілені GPU-обчислення здатні значно підвищити продуктивність систем реального часу, хоча існують обмеження, пов'язані з затримками передачі даних, узгодженням пам'яті та балансуванням навантаження.

Ключові слова: *CUDA; розподілені обчислення; системи реального часу; GPU-обчислення; гетерогенні системи; масштабованість; затримка; середовище виконання.*

Вступ. Сучасні системи реального часу (*RTS*) активно використовуються у критично важливих сферах, таких як авіація, автомобільна промисловість, телекомунікації, промислова автоматизація та робототехніка. Зростання обчислювальних навантажень у *RTS* зумовлено необхідністю обробки великих потоків даних у реальному часі, наприклад, від багатоканальних сенсорів або потоків відеоаналітики. Традиційні *CPU*-системи не завжди забезпечують достатню продуктивність, що створює необхідність застосування гетерогенних обчислювальних платформ із GPU, здатних паралельно виконувати численні задачі [1].

Технологія *CUDA*, розроблена *NVIDIA*, забезпечує високоефективне програмування *GPU* та дозволяє реалізовувати паралельні обчислення, необхідні для прискорення задач у *RTS*. Основна мета дослідження полягає у вивченні ефективності застосування *CUDA* у розподілених гетерогенних системах для задач реального часу з урахуванням обмежень часу відповіді та детермінованості виконання.

Постановка задачі. Розподілені гетерогенні системи поєднують *CPU* та *GPU* на одному або декількох вузлах. Така архітектура дозволяє масштабувати обчислення, підвищувати продуктивність і надійність системи. *GPU* забезпечують високий рівень паралелізму для обчислювальних задач, тоді як *CPU* виконують керуючі та послідовні обчислення.

Для взаємодії між вузлами застосовуються протоколи *MPI* у поєднанні з *CUDA*, що забезпечує розподілену обробку даних та паралельне виконання задач. У таких системах важливим є оптимальне розподілення навантаження,

узгодження доступу до пам’яті та мінімізація latency при передачі даних між вузлами [6].

Основний зміст роботи. Ефективність обчислень оцінюється за такими метриками: прискорення обчислень (*speed-up*), масштабованість (*scalability*), пропускна здатність (*bandwidth*) і затримка (*latency*). Дослідження показують, що одновузлові *GPU*-системи забезпечують значне прискорення (до 300 %) порівняно з *CPU*, а розподілені платформи дозволяють досягти лінійної масштабованості при збільшенні кількості *GPU* [1].

Однак збільшення кількості вузлів призводить до нарощування накладних витрат на передачу даних. У зв’язку з цим особливу увагу приділяють оптимізації комунікацій, балансуванню задач та використанню асинхронних обчислень для зменшення затримок.

Отже, аби оцінити перебіг процесів, що протікають у кластерній системі під час руху відповідних потоків тієї чи іншої інформації, необхідно порівнювати пропускну спроможність мережі кластера і комутатора. Така процедура потрібна для оптимального підбору комплектувальних елементів мережевого інтерфейсу до запропонованої багатопроцесорної системи.

Для мінімізації latency та підвищення продуктивності у *RTS* застосовуються:

– ***CUDA Streams*** для асинхронного перекриття обчислень і передачі даних;

– ***Page-locked memory*** для прискорення *DMA*-передач між *CPU* і *GPU*;

– ***GPUDirect*** для зменшення затримки передачі даних між вузлами;

– ***Балансування навантаження*** для рівномірного використання GPU у розподілених середовищах [5].

Ці методи дозволяють підвищити ефективність обчислень та забезпечити передбачуваний час виконання, що критично для систем реального часу.

Основними проблемами є:

– затримка передачі даних між вузлами;

– узгодження пам’яті у гетерогенних системах;

– вузькі місця в пропускній здатності шин *CPU*↔*GPU*;

– складність програмування та забезпечення детермінованого часу відповіді [4].

Також критичним фактором залишається масштабованість: при великій кількості вузлів збільшується частка часу, витраченого на синхронізацію та комунікацію.

Розподілені *GPU*-системи застосовуються для:

– відеоаналітики у реальному часі;

– автономних транспортних засобів;

– обробки даних сенсорних мереж;

– телекомунікаційних задач.

Правильне розподілення задач між вузлами дозволяє досягти високої продуктивності та зменшити час обробки. Також можливе інтегрування з системами прогнозування процесів на основі нейронних мереж [8].

Методологія включає:

– створення тестових сценаріїв (наприклад, обробка відеопотоку 30 fps або обчислення фізичних моделей у реальному часі);

– вимірювання latency, throughput та масштабованості при різній кількості вузлів;

– порівняння продуктивності *CPU*, одновузлових *GPU* та розподілених *GPU*;

– оцінку впливу оптимізаційних методів (*CUDA Streams*, *GPUDirect*, балансування задач).

Аналіз літератури показує:

– використання *GPU* у розподілених системах значно підвищує продуктивність;

– застосування оптимізацій дозволяє мінімізувати затримки та підвищити детермінованість;

– обмеження накладних витрат на комунікацію та узгодження пам'яті залишаються критичними;

– інтеграція з прогнозуючими та інтелектуальними системами управління дозволяє покращити адаптивність системи [7].

Висновки. Розподілені обчислення на базі *CUDA* забезпечують високий потенціал для систем реального часу. Ефективне використання вимагає:

– ретельного проектування архітектури;

– оптимізації передачі даних;

– балансування навантаження;

– забезпечення детермінованого часу виконання.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на автоматизацію оптимізації, розвиток runtime-систем для гетерогенних платформ та інтеграцію з інтелектуальним управлінням технологічними процесами [6].

Перспективи розвитку. Подальші напрямки розробки включають:

– інтеграцію *Edge/Cloud* у розподілені *GPU*-системи;

– розробку інструментів для забезпечення детермінованості та енергоефективності;

– автоматизацію планування задач та балансування ресурсів;

– поєднання з методами прогнозування та інтелектуального контролю технологічних процесів [7].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Thomadakis, P.; Chrisochoides, N. "Runtime support for CPU-GPU high-performance computing on distributed memory platforms." *Frontiers in High Performance Computing*, 2024, Vol. 2, Article 1417040. DOI:10.3389/fhpcp.2024.1417040.
2. Shan, B.; Arayr-Polo, M.; Chapman, B. "DiOMP-Offloading: Toward Portable Distributed Heterogeneous OpenMP." arXiv:2506.02486, 2025.https://arxiv.org/abs/2506.02486?
3. Runtime support for CPU-GPU high-performance computing on distributed memory platforms – Polykarpos Thomadakis, Nikos Chrisochoides, *Frontiers in High Performance Computing*, 2024. DOI:10.3389/fhpcp.2024.1417040

4. Predictable GPU Sharing in Component-Based Real-Time Systems – Syed W. Ali, Zelin Tong, Joseph Goh, James H. Anderson, *ECRTS 2024* (36th Euromicro Conference on Real-Time Systems). DOI:10.4230/LIPIcs.ECRTS.2024.15.
5. A Review of Recent Hardware and Software Advances in GPU-Accelerated Edge-Computing Single-Board Computers (SBCs) for Computer Vision – U. Iqbal, T. Davies, P. A. Perez, Sensors, 2024, 24(15):4830. DOI:10.3390/s24154830.
6. Гоков О. М. Процеси в атмосфері і атмосферно-іоносферна взаємодія [Електронний ресурс] : монографія / О. М. Гоков. - Х. : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2017. - 135 с.
7. Агрегація обчислювальних каналів на основі платформи nvidia cuda для режимів управління компонентами технологічних систем. / Г. Швачич, П. Щербина, Д. Мороз // *Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2022.
8. Інтелектуальна система прогнозування керування процесами на основі штучної нейронної мережі / Г. Швачич, Б. Мороз, П. Щербина, І. Олішевський // *Системні технології*, 2025.
9. Software analysis for the task of intellectual control of technological processes / H. Shvachych, B. Moroz, P. Shcherbyna, D. Moroz // *Міжнародна науково-технічна конференція Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні*, 2025.

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], М.В. Куваєв[2], Л.В. Різниченко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[2]Інституту транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

VUE.JS – СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ WEB-ІНТЕРФЕЙСІВ

Анотація. У статті розглянуто особливості JavaScript-фреймворку Vue.js та його застосування для створення сучасних інтерфейсів користувача, продемонстровано використання компонентів, директив і стилізованих елементів у побудові інтуїтивно зрозумілого дизайну.

Ключові слова: *Vue.js, компонент, фронтенд, SPA, реактивність, вебінтерфейс.*

Вступ. Сучасні користувачі очікують від вебзастосунків швидкої роботи, зручності та привабливого дизайну. Сучасна веброзробка ставить перед розробниками завдання створювати інтерфейси, які не лише функціональні, але й адаптивні, інтерактивні та приємні для користувача.

Для досягнення цих цілей застосовуються різноманітні технології та фреймворки, що дозволяють підвищувати ефективність розробки та забезпечувати високу якість продукту. Vue.js є одним із таких сучасних інструментів, який використовується у практичній веброзробці та стабільно входить до трійки найпопулярніших фронтенд-фреймворків (рис.1) [1].

Основний зміст роботи. Vue.js – це прогресивний JavaScript-фреймворк для створення користувацьких інтерфейсів, який поєднує простоту використання з потужним функціоналом для розробки вебзастосунків будь-якої складності.

Термін «прогресивний» у контексті Vue означають, що його можна поступово інтегрувати у будь-який проєкт: розробник може почати з невеликих частин інтерфейсу і поступово додавати нові функції, такі як маршрутизація, управління станом або інтерактивні компоненти [2]. Це дозволяє легко масштабувати застосунок і впроваджувати сучасні технології навіть у вже існуючі проєкти.

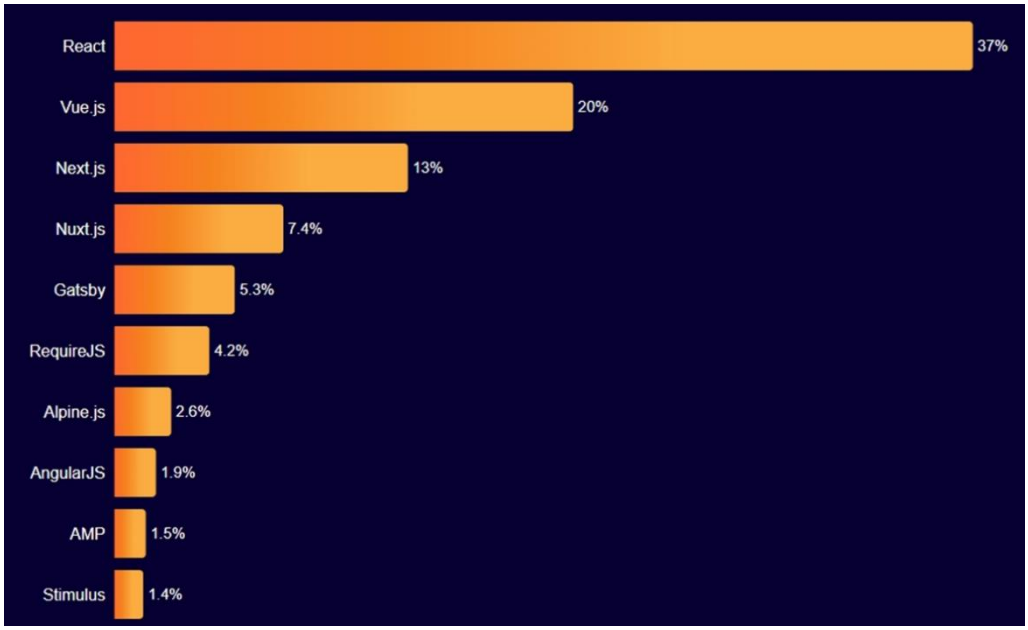


Рис. 1. Популярність фронтенд-фреймворків в 2024 за даними Cloudflare Radar

Однією з ключових особливостей Vue.js є його компонентна структура. Кожен компонент складається зі свого шаблону, логіки та стилів, що дозволяє розробляти автономні частини інтерфейсу, які легко повторно використовувати та підтримувати. Така модульна побудова застосунків спрощує масштабування і дозволяє декільком розробникам працювати над різними частинами проєкту одночасно. Крім того, компоненти можуть бути вкладеними, що створює ієрархічну структуру інтерфейсу і підвищує його гнучкість.

Vue.js забезпечує реактивність – здатність автоматично відстежувати зміни в даних і оновлювати тільки ті частини DOM, які потребують змін. Це дозволяє створювати швидкі та інтерактивні вебінтерфейси, де користувач миттєво бачить результат своїх дій [3]. Реактивність у Vue реалізована через спостережувані об’єкти та спеціальні реактивні API, які значно спрощують роботу з даними.

Ще однією важливою характеристикою Vue.js є декларативне відображення даних. Розробник описує, як повинен виглядати інтерфейс у залежності від стану даних, а фреймворк автоматично оновлює HTML відповідно до цих змін [4]. Це дозволяє зменшити кількість помилок та спрощує читання і підтримку коду.

Vue.js також дозволяє створювати односторінкові застосунки (SPA), де перехід між сторінками відбувається без повного перезавантаження браузера. Це

значно підвищує швидкодію та покращує користувацький досвід. Для керування станом у великих проєктах можна використовувати Vuex, який централізовано зберігає дані та забезпечує синхронізацію між компонентами.

В якості прикладу використання Vue.js при опануванні дисципліни Web-технології та Web-дизайн було розроблено вебпроєкт «My Favorite Movies» (Рис.3). У ньому за допомогою компонентів Vue.js створено інтерфейс для роботи зі списком улюблених фільмів: користувач може додавати нові записи, переглядати вже збережені та шукати потрібні фільми у динамічному списку. Усі зміни відображаються миттєво, без перезавантаження сторінки, що демонструє реактивність та гнучкість фреймворку.

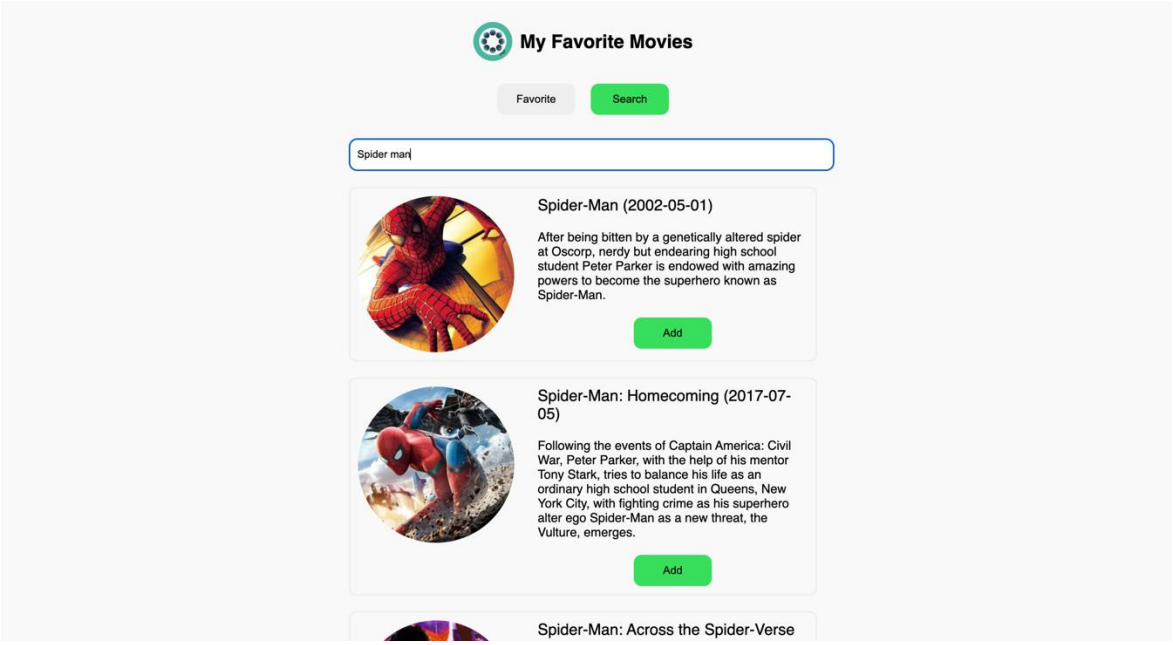


Рис. 3. Приклад розробленого проєкту «My Favorite Movies» за допомогою Vue.js

На практиці Vue.js застосовується для реалізації динамічних таблиць, форм, панелей адміністратора, дашбордів, інтерактивних фільтрів та модальних вікон. Наприклад, у проєкті «My Favorite Movies» Vue.js використовується для динамічного оновлення контенту, реалізації інтерактивних компонентів та забезпечення адаптивності інтерфейсу під різні розміри екранів.

Висновки. Фреймворк Vue.js поєднує простоту, гнучкість та ефективність. Використання цього фреймворку дозволяє розробникам швидко створювати динамічні й адаптивні застосунки. Його компонентна структура, реактивність та декларативний підхід дозволяють створювати сучасні вебінтерфейси, які швидко реагують на дії користувача, легко масштабуються та підтримуються. Завдяки цим властивостям Vue.js залишається одним із найпопулярніших інструментів для фронтенд-розробки, а його екосистема постійно розширюється, що забезпечує розробникам широкий спектр готових рішень та інструментів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cloudflare Radar. Year in Review 2024. Website Technologies. [Електронний ресурс]. – URL: https://radar.cloudflare.com/year-in-review/2024#website-technologies (дата звернення: 31.10.2025).
2. Vue.js. Introduction to Vue.js. [Електронний ресурс]. – URL: https://vuejs.org/guide/introduction.html (дата звернення: 31.10.2025).
3. Vue.js. Reactivity Fundamentals. [Електронний ресурс]. – URL: https://vuejs.org/guide/essentials/reactivity-fundamentals.html (дата звернення: 31.10.2025).
4. Wikipedia. Vue.js. [Електронний ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/ wiki/Vue.js (дата звернення: 31.10.2025).

УДК 004.51

О.В. Горбова
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЛЮДИНО-МАШИННОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТА МЕТОДИ ЇХ ПОДОЛАННЯ

Анотація. У роботі проаналізовано і описано основі сучасні проблеми людино-машинної взаємодії. Висвітлено, які труднощі вони несуть для користувачів при людино-машинній взаємодії, та запропоновано методи їх вирішення.

***Ключові слова**: людино-машинна взаємодія, користувальницький інтерфейс, UX-інтерфейс, користувач, програмний застосунок.*

Вступ. На сьогодні питання людино-машинної взаємодії стає більш актуальним, особливо тоді, коли час швидкоплинний, і з появою нового програмного забезпечення та створення того бар'єру, який дає можливість цільовій аудиторії взаємодіяти з програмою.

Особливої уваги потребують саме сучасні проблеми такої взаємодії, до яких відноситься не лише питання зручності, а ще й питання етики, психології, довіри й людяності у цифровому світі.

Звісно є емпіричні методи, які дозволяють вичерпно оцінити та надати практичні рекомендації щодо покращення основних складових людино-машинного інтерфейсу, задати або покращити сценарії використання програмних застосунків – що покращить зручність використання, а, як наслідок лояльність, до програмного продукту. Проте цільова аудиторія, що є досить різною при застосуванні ресурсів, окрім зручності може ставити у пріоритеті питання візуального сприйняття та етики та естетики сприйняття на перші сходинки у своїх вподобаннях використання програмних застосунків. Тому доречно було б розглянути саме питання розвитку проблем людино-машинної взаємодії та їх подолання в сучасних умовах.

Постановка задачі. Для висвітлення проблематики у роботі були сформовані та вирішені наступні завдання:

- проаналізовано сучасні проблеми людино-машинної взаємодії;
- виявлені труднощі, з якими стикаються користувачі при взаємодії з інтерфейсами програмних застосунків;
- запропоновано методи вирішення описаних проблем при проєктуванні інтерфейсів користувача;
- зроблено висновки щодо подолання сучасних проблем людино-машинної взаємодії.

Основний зміст роботи. Під час роботи над даною роботою булі використані наступні методи та інструменти.

- 10 методів евристичної оцінки Я. Нільсена для оцінки дизайну інтерфейсу користувача;
- стратегія та usability-тестування;
- правила розробки UX/UI web-дизайнів;
- принципи візуального сприйняття користувача: фізіологічні та когнітивні аспекти сприйняття.

Однією із перших проблем візуального сприйняття взаємодії є питання когнітивного перевантаження користувача. Так як сучасні інтерфейси часто містять занадто багато інформації, сповіщень, функцій, тощо і в свою чергу мозок користувача не встигає обробити увесь потік сигналів це все призводить до зниження уваги, помилок при виконанні завдань та як наслідок швидкої втоми користувача при взаємодії із застосунком. Щоб подолати вказану проблему бажано притримуватися принципи мінімалізму, оптимізувати контент в враховуючи інтереси аудиторії та спираючись на актуальні тренди сучасного розвитку та де це можливо використати UX-патерни «менше – це більше». Як приклад такої взаємодії можна навести додатки з безліччю налаштувань, банерів і повідомлення соцмереж тощо.

Другою сучасною проблемою розробки систем людино-машинної взаємодії є нестача інтуїтивності в інтерфейсах. Все це пов’язано з тим, що переважну частину систем досі створюють, використовуючи еталон технічної логіки. У зв’язку з цим нові користувачі часто не розуміють, де знайти необхідну функцію або як завершити ту чи іншу дію застосунку, а також, що можуть означати деякі незнайомі іконки чи жести. Юзабілиті дослідження показали, що системи розширеної та віртуальної реальності, системи Smart TV та системи автомобільних інтерфейсів є недостатньо інтуїтивними і потребують удосконаленню саме з точки зору взаємодії з користувачем. Цю проблему можна подолати шляхом залученням ментальних моделей користувача, створення системи підказок та когнітивних покрокових інструкцій.

Із швидким впровадженням та використанням штучного інтелекту спостерігається проблема у людино-машинній взаємодії, що обумовлена надмірною автоматизацію із «втратою контролю» при роботі з програмним застосунком та мультимодальною взаємодією, пов’язану з голосом, жестами,

віртуальної та доповненої реальностей. Надмірна автоматизація, впроваджена в програмний процес, викликає недовіру у користувача під час взаємодії, страх зробити помилку при виконанні сценарію чи виконанні алгоритму, окрім того, користувач отримує відчуття втрати автономності, тобто не може контролювати роботу програмного застосунку. В такому випадку потрібен баланс між автоматизацією і можливістю користувача втрутитись у роботи програми для керування її роботою. А розширення використання мультимодальної взаємодії ускладнює саму розробку дизайну. Проблема, що виникає при цьому, пов'язана з тим, що у дизайні присутня неоднозначність команд, контекст може мати помилки у вигляді шуму для голосових систем, та підсумком взаємодії з інтерфейсом є фізична втома користувача при взаємодії (наприклад, напруга очей, головний біль і заколисування від використання віртуальної реальності). В такому випадку необхідно розробляти контекстно чутливі інтерфейси та багаторівневі зворотні зв'язки при взаємодії з користувачами.

При використанні програм взаємодія користувачів з ними вимагає етичності та приватності. Сучасні системи під час своєї роботи збирають величезні обсяги даних, таких як поведінкових, біометричних або емоційних, і людина часто не усвідомлює, які дані де знаходяться та як можуть бути використані системами. Проблеми, з якими стикаються користувачі, полягають в порушенні приватності, відстеження уподобань чи пріоритетних запитів без їх особистої згоди, використанні дискримінаційних алгоритмів, а також маніпуляції поведінкою через використання так званих «темних шаблонів». Вирішення питання у створенні таких взаємодій пов'язане з прозорістю, контролем над даними та чесне інформування користувача про зібрані та використані системами дані.

Наступна проблема машинної взаємодії, яку можна виділити, це персоналізація чи маніпуляція. Алгоритми, що працюють із ресурсами, персоналізують досвід користувача і водночас обмежують його інформаційне поле. Робота алгоритмів зводиться до того, що людина бачить лише «зручне» або «звичне» для неї, тим самим формується ефект бульбашки. Вирішенням проблеми є удосконалення UX персоналізації, але так, щоб цей інтерфейс не був маніпулятивним.

Не останнє місце займає питання інклюзивності та доступності програмних продуктів. На жаль, не всі сучасні інтерфейси враховують потреби людей з обмеженими можливостями або різні культурні контексти. Такі проблеми включають застосування маленьких шрифтів, низького контрасту та відсутність альтернативного тексту. Рішенням такої проблеми було б впровадженням та застосування «інклюзивного дизайну», тобто створення програмних продуктів, які доступні кожному, незалежно від віку, зору, моторики чи мови. Це б розширило довіру та лояльність до програмного продукту цільової аудиторії.

Сучасні UX-системи навмисно створюють «ефект залипання» – нескінченні стрічки, заповнення автополей та створення повідомленнь, що

викликають у користувача залежність і чинять на нього психологічний вплив, користувач при цьому отримує цифрову залежність, тривожність та зниження концентрації. Прикладом таких систем є TikTok, Instagram, YouTube Shorts тощо. Вирішенням вищеописаної проблеми є створення етичного UX-дизайну, що має обмежувати надмірне залучення уваги користувача, пропонуючи здорові патерни взаємодії.

Якщо підводити підсумок всіх виділених проблем пов'язаних з людино-машинною взаємодією, то, мабуть, не останнє місце займає проблема зміщення від користувача до системи. У сучасному світі цифрових технологій відбувається зміщення основного фокусУ у прийнятті рішень людино-машинної взаємодії на систему, при цьому UX більше орієнтований на технологію, ніж на людину, через що людина змушена пристосовуватись до інтерфейсів, а не навпаки, дизайн і логіка взаємодії все частіше визначаються технічними можливостями системи, а не потребами, цілями чи ментальними моделями користувача. Цій проблемі можна протидіяти, повернувшись до створення дизайну, орієнтованого на користувача, розроблювати системи, які співпрацюючи з користувачем, є прозорими і пояснюють свої дії/відповіді у вигляді повідомлень, мають дозвіл на вибір за користувача, є зрозумілими, контрольованими, чесними і допомагають користувачу у прийнятті рішень, проте так, що користувач відчуває свій контроль у цій взаємодії.

Таким чином, сучасна людино-машинна взаємодія – це людино-орієнтований штучний інтелект, де технологія підлаштовується під людину, її контекст, емоції та потреби.

Наукова новизна розробки складається в удосконаленні емпіричного підходу до проєктування людино-машинної взаємодії та створення дружнього сучасного користувальницького інтерфейсу для користувачів різних категорій.

Висновки. В результаті проведеної роботи можна зробити висновки, що сучасні проблеми людино-машинної взаємодії – це не лише питання зручності, а ще і етики психології, довіри й людяності у цифровому світі. Описане питання полягає в тому, як узгодити та поєднати автоматизацію і контроль, зробити технології більш доступними для інклюзивних користувачів, зберегти їх увагу та ментальне здоров'я та створити інтерфейси користувача, які не просто працюють, а і ще й підтримують людські цінності, що наразі є найважливішим у сучасному цифровому світі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alan Cooper, Robert Reimann, David Cronin, Christopher Noessel, About Face: The Essentials of Interaction Design 4th Edition – Wiley, 2014 – 720 p.
2. Ben Shneiderman, Catherine Plaisant, Maxine Cohen, Steven Jacobs, Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction (6th Edition) – Pearson, 2017 – 616 p.
3. Jakob Nielsen, Usability engineering – Morgan Kaufmann, 1994 – 362 p.
4. Journal of Human–Computer Interaction: https://www.tandfonline.com/journals/hihc20 [Електронний ресурс] – Дата звернення. 06.11.2025.

5. Nielsen Norman Group: https://www.nngroup.com/articles/ [Електронний ресурс] – Дата звернення. 06.11.2025.
6. Дональд А. Норман, Дизайн звичайних речей – КСД, 2023 – 320 с.
7. Сьюзен Вайншенк, Книга 100 речей, які кожен дизайнер повинен знати про людей – ArtHuss, 2024 – 244 с.

УДК 004.8, 004.415.25

Д.Д. Мовлик[1], Н.О. Соколова[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРОЦЕДУРНА ГЕНЕРАЦІЯ ІГРОВОГО СВІТУ НА РУШІЇ UNITY З ВИКОРИСТАННЯМ ШІ ТА ПАТЕРНІВ ПРОЄКТУВАННЯ

Анотація. Описано процес створення прототипу 2D-RPG гри у рушії Unity з реалізацією основних механік: руху персонажа, бойової системи, штучного інтелекту ворогів, генерації світу та інтеграції системи анімації.

***Ключові слова**: Unity, 2D-RPG, C#, процедурна генерація, штучний інтелект, патерни проєктування Navmesh, Tilemap.*

Вступ. Ігрова індустрія є однією з найбільш динамічних галузей у сучасній індустрії геймдевелопменту, оскільки такі проєкти дозволяють досліджувати механіки гри, штучний інтелект (ШІ), генерацію світу та інтерфейс користувача [1]. Значну частку займають так звані інді-проєкти (англ. indie games від independent – «незалежний» – відеоігри, створені без фінансової підтримки великих видавців), зокрема 2D-RPG [2-4]. Unity – одна з найпопулярніших платформ для створення 2D-ігор, завдяки своїй гнучкості, інтеграції з Tilemap, ScriptableObject та іншими інструментами.

Незважаючи на постійний розвиток інструментів, актуальними залишаються проблеми масштабування, повторюваності ігрового світу та примітивної поведінки ворогів. У багатьох сучасних 2D-RPG іграх ігровий світ проєктується вручну, що обмежує різноманітність ігрового процесу. Аналогічно, логіка поведінки ворогів часто реалізується за допомогою статичних шаблонів. Ці фактори значно знижують реіграбельність. Для подолання цих обмежень доцільно використовувати процедурну генерацію ігрового середовища та створювати гнучку систему штучного інтелекту для ворогів [5-7]. Процедурна генерація (PCG) як спосіб автоматичного створення ігрового контенту широко обговорюється в технічних спільнотах, оскільки дозволяє створювати різноманітні локації, рівні та інші елементи гри без необхідності їх ручного створення. Однак, цей підхід стикається зі значними викликами, зокрема з проблемою контролю над кінцевим результатом: генеративні алгоритми можуть створювати непередбачувані, небалансовані або навіть неігрові ситуації, що

негативно впливає на досвід гравця. Недостатній контроль також може призвести до повторюваності контенту, втрати унікальності та порушення геймплейного балансу.

У цьому дослідженні розглядається процес створення 2D-RPG гри на рушії Unity з використанням ШІ, зокрема реалізація персонажів, системи бойових взаємодій та генерації світу на основі патернів проєктування.

Постановка задачі.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- Провести аналіз сучасних ігор жанру 2D-RPG з метою виявлення типових рішень щодо побудови ігрового світу та ШІ-систем.
- Дослідити наявні методи процедурної генерації ігрового світу, в тому числі популярні патерни проєктування та визначити придатні для 2D-середовища.
- Проаналізувати підходи до моделювання поведінки ворогів у 2D-іграх.
- Оцінити технічні можливості рушія Unity для реалізації зазначених компонентів.
- Сформувати загальну архітектуру ігрового застосунку з урахуванням процедурної генерації світу та динамічного ШІ.

Основний зміст роботи.

Для досягнення мети було використано кросплатформний ігровий рушій Unity. Поведінка ворожих ШІ-агентів реалізована на основі моделі скінченного автомата (FSM), що є розповсюдженим патерном проєктування [8, 9]. Система навігації ШІ-агентів базується на стандартному компоненті NavMesh, адаптованому для 2D-середовища за допомогою стороннього розширення. Створення ігрового світу реалізовано гібридним підходом: базовий ландшафт згенеровано за допомогою системи Tilemap, а наповнення оточення автоматизовано через алгоритм випадкового розміщення об'єктів [10, 11].

Розробка складалась з наступних кроків:

1. Створення персонажів та анімацій.

Для створення персонажів (Hero та Skeleton) використовуються Sprite Pack, Sprite Renderer та Animator Controller. Анімації реалізуються за допомогою Finite State Machine (FSM), де визначаються стани: Idle, Walking, Attack, Dead. Для контролю анімацій використовуються параметри Animator (наприклад, isMoving, isAttacking).

2. Система бойових взаємодій

Бойова система реалізується через компоненти Box Collider 2D, Rigidbody 2D та скрипти, що відповідають за нанесення та отримання пошкоджень (EnemyHealth, HeroHealth). Використовуються Animation Event для активації атаки та перевірки зони атаки через Physics2D.OverlapCircleAll.

3. Штучний інтелект ворогів

Для реалізації ШІ поведінки ворогів використовується NavMesh та NavMeshAgent, адаптовані для 2D-середовища за допомогою NavMeshPlus. Вороги можуть пересуватися по мапі, відстежувати героя та атакувати його. Для керування поведінкою використовується FSM, що включає стани: Idle, Chasing, Attacking.

4. Генерація світу

Світ гри створюється за допомогою Tilemap, де використовуються різні тайли для ландшафту, перешкод та об'єктів. Для процедурної генерації світу можуть застосовуватися алгоритми, такі як Perlin Noise, BSP-дерева або Marching Squares.

5. Система керування та камера

Керування персонажем реалізується через Unity Input System, де визначаються Action Maps для руху та атаки. Для камери використовується Cinemachine, що дозволяє автоматично слідкувати за героєм та налаштовувати параметри камери.

Для створення персонажів (наприклад, Hero та Skeleton) використовуються спрайт-паки, які містять окремі кадри анімації для різних станів: Idle, Walking, Attack, Dead. Спрайти імпортуються в Unity, налаштовуються в Sprite Editor: встановлюється режим Multiple, визначається Pivot (точка обертання), що забезпечує коректне відображення персонажа під час руху.

Кожен персонаж отримує компоненти:

- Sprite Renderer – для відображення спрайтів.
- Box Collider 2D – для визначення зони персонажа.
- Rigidbody 2D – для фізичного руху та взаємодії.
- Animator Controller – для керування анімаціями.

Анімація персонажів реалізується через Animator Controller, де створюється Finite State Machine (FSM). Для персонажа визначаються стани:

- Idle – спокійний стан.
- Walking – рух.
- Attack – атака.
- Dead – смерть.

Параметри Animator (наприклад, isMoving, isAttacking) використовуються для переходу між станами. Наприклад, коли гравець натискає кнопку руху, параметр isMoving стає true, і персонаж переходить у стан Walking.

Анімація активується через скрипти, які реагують на введення користувача. Для цього використовується Unity Input System, де визначаються Action Maps для руху та атаки. При активації атаки, викликається відповідна анімація, а також Animation Event, який запускає функцію нанесення пошкоджень.

Для ворогів (Skeleton) додатково реалізується система Health (EnemyHealth), яка відстежує стан персонажа. При отриманні пошкоджень,

викликається анімація смерті, а компоненти Box Collider та Rigidbody вимикаються, щоб ворог більше не взаємодіяв зі світом.

Система бойових взаємодій реалізується через комбінацію фізичних компонентів, скриптів та анімаційних подій, що забезпечує реалістичну та інтерактивну бойову механіку.

Для реалізації бойових взаємодій використовуються:

- Box Collider 2D – для визначення зони атаки та отримання пошкоджень.
- Rigidbody 2D – для фізичного руху та реакції на пошкодження.

Нанесення пошкоджень реалізується через Animation Event, який активується під час анімації атаки. У скрипті атаки (наприклад, EnemyCombat або HeroCombat) викликається функція DealDamage, яка використовує Physics2D.OverlapCircleAll для перевірки, чи є вороги в зоні атаки. Якщо так, викликається метод TakeDamage у скрипті здоров'я цілі, що зменшує її HP. Після отримання пошкоджень:

- Викликається анімація пошкодження або смерті.
- Якщо HP стає 0, персонаж переходить у стан Dead, де вимикаються Box Collider 2D та Rigidbody 2D, щоб він більше не взаємодіяв зі світом.
- Для ворогів може бути реалізована затримка перед знищенням об'єкта (DelayedDestroy), щоб анімація смерті відігралася повністю.
- Для гравця (Hero) реалізується аналогічна система, але з додатковим контролем через Input System.
- Для ворогів (Skeleton) використовується ШІ, який відстежує гравця та активує атаку при наближенні.

У сфері штучного інтелекту для ігрових персонажів (NPC) основним завданням залишається забезпечення адаптивної поведінки, що дозволяє персонажам реагувати на дії гравця та зміни у середовищі гри. Це досягається за допомогою сучасних методів моделювання інтелекту, таких як нейронні мережі, reinforcement learning та інші підходи, які дозволяють створювати більш реалістичну та динамічну взаємодію між гравцем і ігровим світом [12].

Штучний інтелект ворогів у Unity реалізується за допомогою NavMesh та NavMeshPlus – спеціалізованого розширення для 2D-ігор, яке дозволяє ворогам рухатися по мапі, уникати перешкод та відстежувати гравця. NavMeshSurface – компонент, який генерує навігаційну сітку (NavMesh) на основі геометрії сцени. Для 2D-ігор потрібно використовувати NavMeshPlus, оскільки стандартний NavMesh призначений для 3D. NavMeshAgent – компонент, який додається до об'єкта ворога і відповідає за рух по NavMesh. Navigation Modifier – компонент, який дозволяє вказати, які області є прохідними, а які – ні (наприклад, стіни, перешкоди).

Після завантаження NavMeshPlus з GitHub створюється порожній об'єкт у сцені, до якого додається компонент Navigation Surface та NavMeshCollecSources2d. Поверхня навігації налаштовується на XY-площину (для 2D-ігор). Створення прохідних та непрохідних областей. Для прохідних

областей (наприклад, підлога) додається компонент Navigation Modifier, встановлюється тип «Walkable». Для перешкод (стіни, об'єкти) додається Navigation Modifier з типом «Not Walkable». Після налаштування всіх об'єктів натискається кнопка Bake у компоненті Navigation Surface, щоб згенерувати NavMesh. NavMeshPlus підтримує Tilemap, спрайти та 2D-колайдери, що дозволяє використовувати стандартні інструменти Unity для створення мап. При зміні мапи (наприклад, додаванні нових перешкод) потрібно повторно натиснути Bake, щоб оновити NavMesh.

Для реалізації поведінки ворога додається NavMeshAgent з компонентом NavMeshAgent, який автоматично використовує згенерований NavMesh для руху. Властивості NavMeshAgent (наприклад, швидкість, радіус, висота) налаштовуються в інспекторі. Створюється скрипт, який визначає ціль (гравця) та викликає метод SetDestination у NavMeshAgent, передаючи позицію гравця. Ворог автоматично знаходить шлях до гравця, обходячи перешкоди. Цей скрипт дозволяє ворогу слідкувати за гравцем у реальному часі.

В основі системи ШІ лежить патерн проєктування Стан (State Pattern), який реалізує модель скінченого автомата (FSM) [8]. Цей підхід, реалізований у скрипті EnemyAI.cs, дозволяє чітко розділити логіку поведінки ворога на окремі, керовані стани: Idle/Roaming (Спокій/Патрулювання), Chasing (Переслідування), Attacking (Атака) та Dead (Смерть).

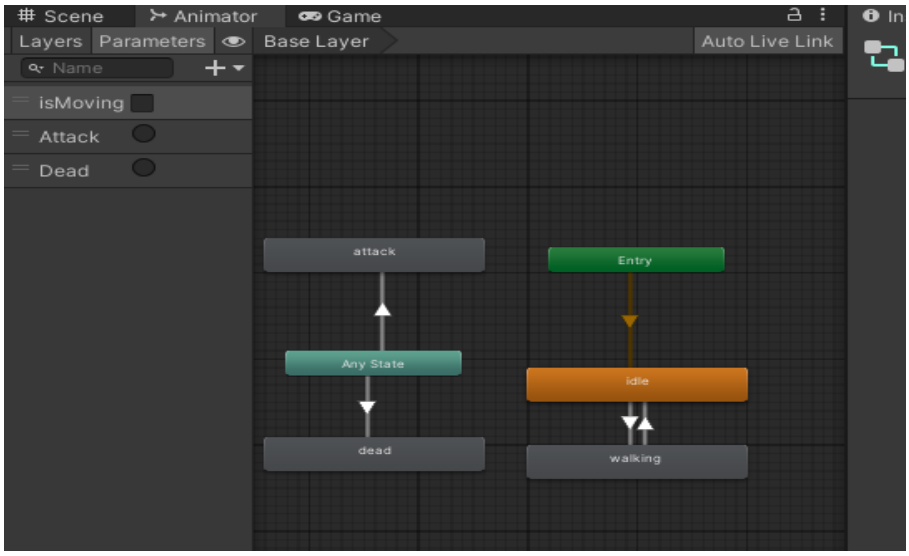


Рис. 1. Схема скінченого автомата (FSM) для ШІ ворога

Архітектура ШІ складається з кількох ключових компонентів. «Очима» ШІ, що відповідають за виявлення гравця, слугує компонент Circle Collider 2D, налаштований як тригер. Коли гравець потрапляє в цей «агро»-радіус, FSM автоматично отримує сигнал і переводить ШІ зі стану Idle у стан Chasing. (Рис.1).

Для реалізації руху, або «ніг» ворога, у 2D-просторі була вирішена ключова технічна проблема. Оскільки стандартний інструмент Unity NavMesh орієнтований на 3D, було інтегровано стороннє розширення NavMeshPlus. Це дозволило коректно «запікати» (Bake) навігаційну сітку на основі 2D-

компонентів (Tilemap), надавши ШІ-агентам можливість знаходити шлях та оминати перешкоди.

«Руки» ШІ, або його бойова система, також тісно інтегровані з FSM. Коли ШІ знаходиться у стані Attacking, він не просто завдає шкоди, а запускає анімацію. Фактичний удар синхронізовано з анімацією через Animation Event, що є класичною реалізацією патерну «Спостерігач» (Observer) та гнучким підходом до керування ШІ. (Рис.2)

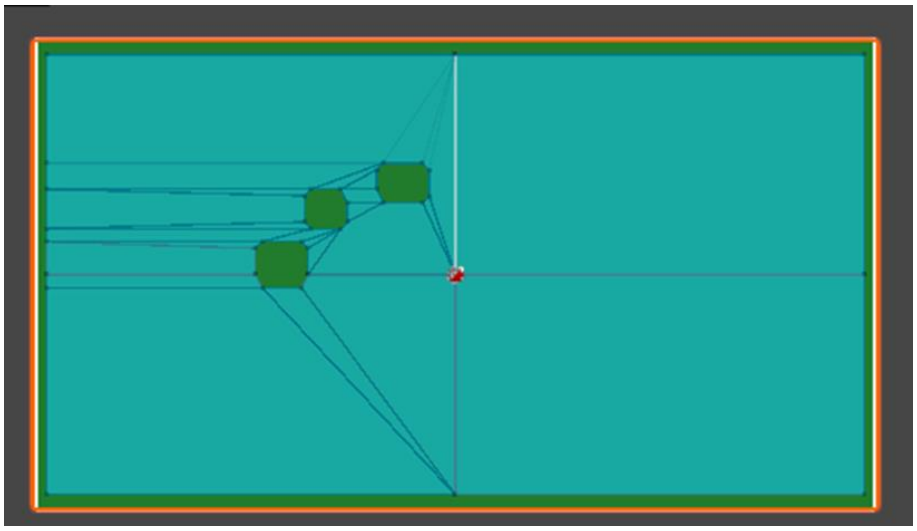


Рис. 2 - Навігаційна сітка

Для усунення проблеми повторюваності ігрового світу та скорочення часу на ручне створення рівнів було впроваджено механізм процедурної генерації. Ігровий світ реалізовано гібридним способом: спочатку базовий ландшафт (трава) створюється за допомогою системи Unity Tilemap, що є ефективним підходом для роботи з 2D-оточенням, а потім до нього додаються деталі (перешкоди, дерева) у вигляді окремих префабів. Для автоматизації цього процесу розроблено скрипт RandomGanarate.cs, який забезпечує унікальну конфігурацію об’єктів при кожному запуску гри. Хоча цей підхід є ефективним, він потребує додаткового контролю для запобігання типовим проблемам процедурної генерації, наприклад, блокуванню проходів. (Рис. 3)

Реалізація механік гравця розпочалася з налаштування сучасної системи керування. Для цього було обрано пакет Unity Input System, що дозволив гнучко налаштувати дії (Input Actions) та карти дій (Action Maps «Hero» та «Combat»), повністю відокремивши логіку гри від обробки вводу. Глобальний доступ до системи вводу забезпечено через патерн Одинак (Singleton) у скрипті GameInput.cs. (Рис. 4).

Рис. 3 - Гібридний ігровий світ

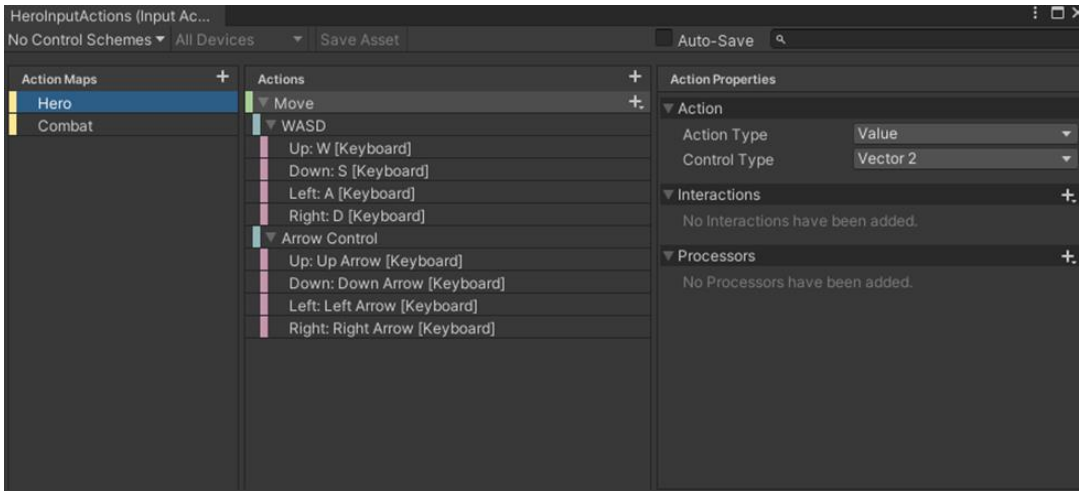


Рис. 4 - Налаштування дії Move в Input Actions

Система керування відповідає не лише за рух, а й за візуальне представлення: скрипт HeroVisual.cs постійно отримує позицію миші, щоб автоматично повертати спрайт гравця (SpriteRenderer.flipX) у напрямку прицілювання. Бойова система гравця, аналогічно до ШІ, тісно синхронізована з анімаціями. Натискання кнопки атаки активує тригер аніматора, який, у свою чергу, запускає Animation Event у ключовому кадрі. Ця подія викликає метод TriggerDamage(), що створює невидиму круглу зону (Physics2D.OverlapCircleAll) для виявлення та ураження ворогів.

Важливою частиною оточення та ігрового досвіду є камера. Для її реалізації використано пакет Cinemachine, що дозволив уникнути написання власних скриптів для слідування. Створення об’єкта Virtual Camera та прив’язка його компонента Follow до об’єкта гравця забезпечили миттєве досягнення динамічної та плавної камери, що є стандартом для 2D-ігор. (Рис. 5)

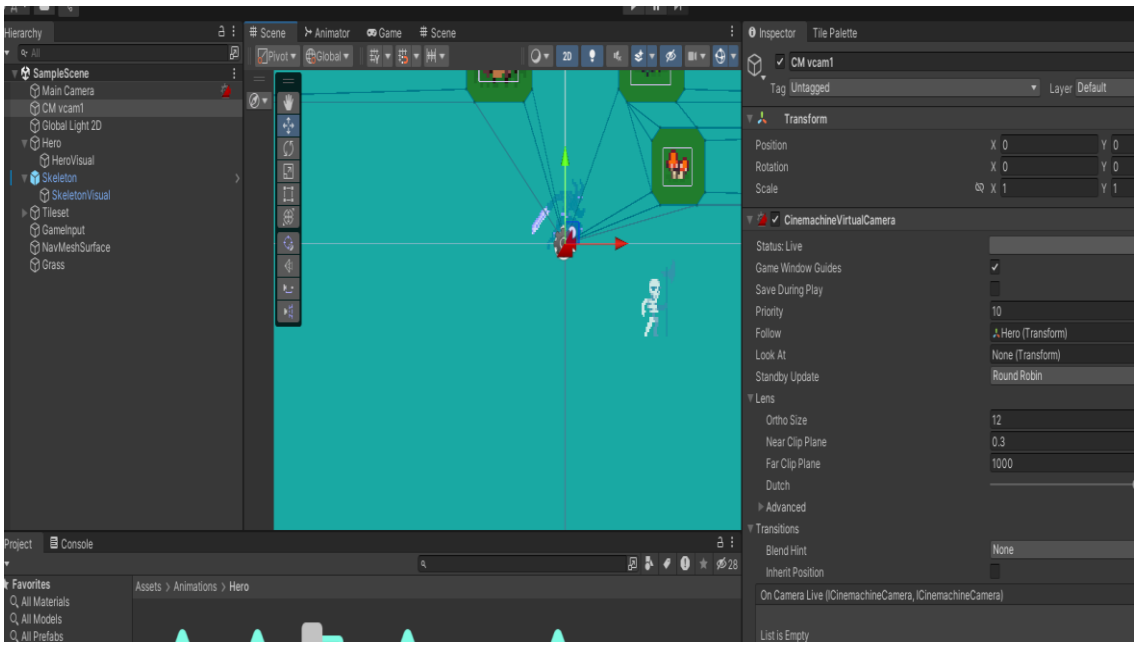


Рис. 5. Налаштування віртуальної камери

Наукова новизна. Класичні 2D-RPG, такі як Hollow Knight та Hyper Light Drifter, часто використовують ручне проєктування рівнів і статичні шаблони поведінки штучного інтелекту, що обмежує реіграбельність ігрового процесу. Наукова новизна цієї роботи полягає у практичному поєднанні алгоритмів процедурної генерації (які успішно застосовуються, наприклад, у грі Dead Cells) та динамічних FSM для ШІ в єдиному програмному комплексі.

Висновки. В результаті роботи було створено функціональний прототип 2D-RPG ігрового застосунку із цілісною архітектурою. Проєкт успішно поєднує механіки процедурної генерації та керованого станами штучного інтелекту, що підтверджує досягнення поставленої мети.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Games Market Reports and Forecasts. Newzoo, 2025. URL: https://newzoo.com/games-market-reports-and-forecasts
2. Global Indie Games Market Report 2024. Oct 13, 2024 URL: https://app.sensortower.com/vgi/insights/article/global-indie-games-market-report-2024
3. Інді-ігри, які здивували в 2025 році. Укрбізнес, 14.09.2025. URL: https://in-ukraine.biz.ua/indi-igry-yaki-zdyvuvaly-v-2025-roczi/
4. Назаренко І. Топ-10 інді-ігор, які обов'язково потрібно спробувати у 2025 році. Уніан, 19.05.25. URL: https://www.unian.ua/games/indi-igri-top-10-indi-igor-yaki-obov-yazkovo-potribno-pograti-u-2025-roci-13013238.html
5. Geris, Ali & Çukurbaşı, Barış & Mihci, Can & Aker, Çakır & Küçük, Hamdi & Ergen, İsmail & Şentürk, Oğuz & Aydemir, Rahmi & Kotan, Soner & Taçgın, Zeynep & Bal, Abdullah. (2025). Revolutionising game design: The role of AI in enhancing player experience, interaction, and engagement. Öneri Dergisi. 20. 89-113. DOI: 10.14783/maruoneri.1499524
6. Mehta, Niket, The Role of AI in Game Development and Player Experience (January 17, 2025). Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communication (ICICC 2024), Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=5101269 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5101269

7. Bukovskyi, Volodymyr & Zdobytskyi, Andriy & Pytel, Krzysztof. (2024). Development and research of an intelligent system for creating board games. Computer Design Systems. Theory and Practice. 6. 79-86. 10.23939/cds2024.03.079.
8. Степанов Л. Створення штучного інтелекту ворогів у іграх. Поради Senior Gameplay Designer компанії Remedy. 2024. URL: https://gamedev.dou.ua/blogs/enemy-ai-in-games/
9. Hollow Knight. URL: https://store.steampowered.com/app/367520/Hollow_Knight.
10. Oliveira R. Complete Guide to Unity Procedural Generation. 2023. URL:https://gamedevacademy.org/complete-guide-to-procedural-level-generation-in-unity-part-1/
11. Talbert L. Procedural Generation with Unity and C#. 2018. URL: https://www.red-gate.com/simple-talk/development/dotnet-development/procedural-generation-unity-c/
12. Бур'янов Д. С. Аналіз сучасних підходів до моделювання адаптивної поведінки агентів у віртуальних екосистемах. Зв'язок, 2025, №5. С. 95-100.

УДК 004.4:004.738.5:659.3

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], П.О. Іщук[1], А.П. Степанова[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

FIGMA ЯК СУЧАСНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ДЛЯ РОЗРОБКИ ВЕБМАКЕТІВ ТА ПРОТОТИПІВ

Анотація. В роботі наведено сучасні можливості сервісу Figma, описано базові інструменти програми, її унікальні переваги, а також функції, що виділяють це середовище серед інших дизайнерських платформ: плагіни, компоненти, стилі, маски та система прототипування. Задля демонстрації можливостей середовища наведено макет вигаданого сайту-реклами навушників AirPods Pro Max.

Ключові слова: *Figma, вебдизайн, інтерфейс, Auto Layout, компоненти, стилі, маски, плагіни, прототипування, дизайн-система, адаптивний макет.*

Вступ. У сучасному світі цифрових технологій ефективна розробка вебінтерфейсів потребує не лише творчого підходу, а й зручних інструментів для спільної роботи дизайнерів і розробників. Одним із найпопулярніших рішень, що поєднує функціональність, зручність, гнучкість, доступність та швидкодію, є Figma – хмарне середовище для створення вебмакетів, інтерфейсів та інтерактивних прототипів. Цей інструмент дозволяє працювати в режимі реального часу, забезпечує швидку взаємодію між членами команди та оптимізує процес розробки продуктів.

Основний зміст роботи. Figma має інтуїтивний інтерфейс, що дозволяє створювати фрейми, фігури, тексти та зображення. Користувач може використовувати сітки (Grid) для точного розміщення елементів, а також групування об'єктів для впорядкування макета. Важливою функцією є Auto Layout – інструмент, що дає змогу створювати адаптивні елементи та блоки, які автоматично підлаштовуються під вміст, відступи, розміри та зміну пропорцій

екрану. Аналоги Auto Layout існують і в інших редакторах, проте саме у Figma цей механізм реалізовано найбільш гнучко, що робить його одним із ключових інструментів для побудови інтерфейсів та дизайн-систем [2].

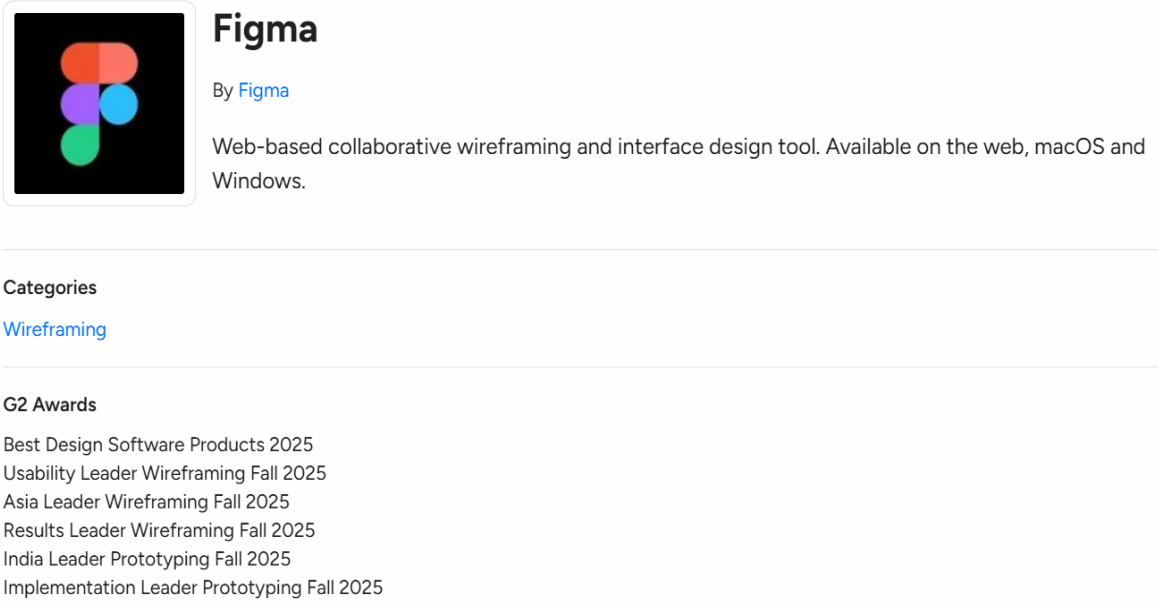


Рис. 1. Нагороди Figma за даними платформи G2 [1]

Компоненти є ще одним важливим елементом функціоналу. Це шаблонні об’єкти (кнопки, картки, іконки), які можна багаторазово використовувати у макеті (рис. 5). Зміни в головному компоненті автоматично оновлюють усі його екземпляри, що забезпечує узгодженість інтерфейсу та значно прискорює роботу. Усі головні компоненти зберігаються у вкладці Assets, через яку дизайнер може швидко додати потрібний екземпляр елемента з бібліотеки або дизайн-системи до свого макета.

Ще однією важливою можливістю Figma є плагіни, які значно розширюють базовий функціонал редактора та автоматизують рутинні завдання. Вони допомагають додавати іконки, генерувати текст, створювати вайрфрейми (структурні схеми), формувати мокапи (реалістичні зображення пристроїв з розміщеним макетом всередині) або виконувати технічні операції в один клік (перевірка орфографії, контрастності тощо) [3].

Також перевагою Figma є можливість створення інтерактивних прототипів у вкладці Prototype, де можна налаштовувати переходи, анімації, натискання та стан елементів (рис. 2). Завдяки цьому дизайнери можуть демонструвати поведінку інтерфейсу без необхідності написання коду, що значно полегшує комунікацію між дизайнерами, розробниками та замовниками.

Як приклад практичного застосування інструментів Figma, в межах опанування дисципліни «Web-технології та web-дизайн», було розроблено вебмакети рекламного лендінгу для навушників AirPods Pro Max для екрану комп’ютера та мобільних пристроїв (рис.3). Під час розробки макета використано інструмент Auto Layout, що забезпечив коректну структуру секцій,

узгоджене вирівнювання елементів та їх автоматичну адаптацію до різних розмірів екранів.

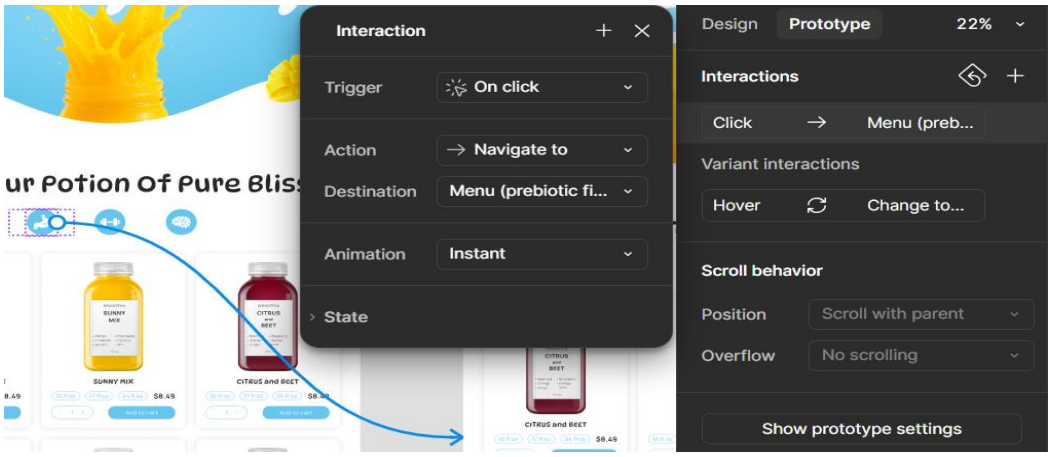


Рис. 2. Прототипування у Figma

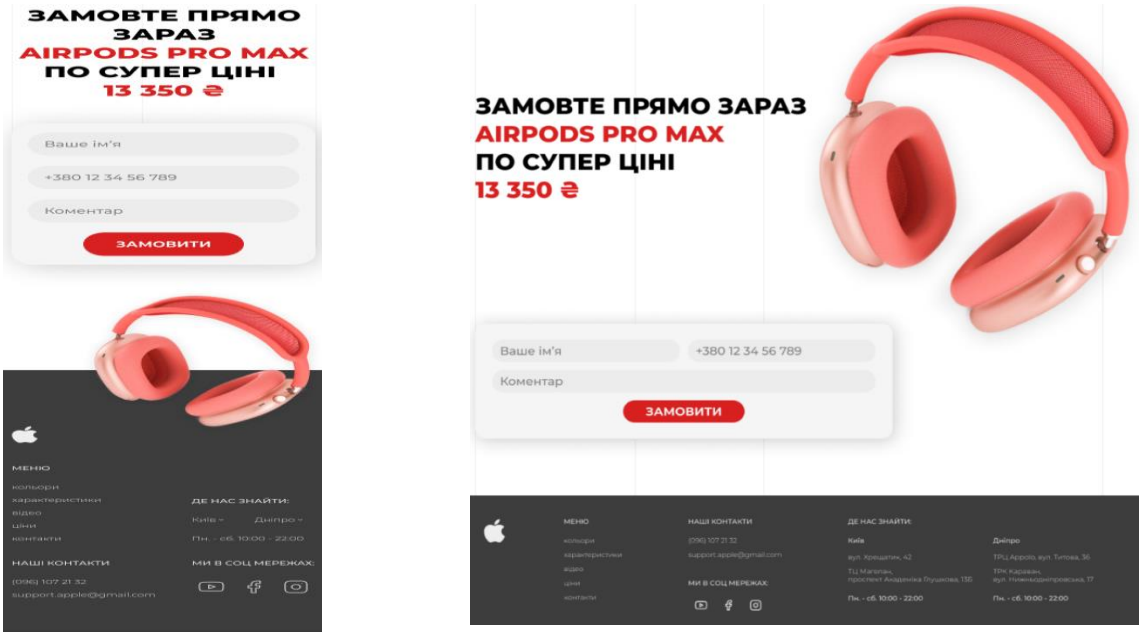


Рис. 3. Фрагменти мобільної та десктопної версій розроблених макетів

Для вставлення піктограм застосовано плагін Iconify. Кнопки, поля введення та картки товару реалізовано у вигляді компонентів, що дало змогу багаторазово використовувати їх у різних частинах лендінгу та легко змінювати через головний компонент. Використані шрифти, кольори та ефекти були занесені до стилів, що полегшило їх редагування. У результаті створено цілісний адаптивний лендінг, який наочно демонструє застосування основних інструментів Figma для побудови сучасних інтерфейсів.

Висновки. За останнє десятиріччя Figma зарекомендувала себе як зручне та ефективне середовище для створення інтерфейсів завдяки підтримці компонентів, стилів, адаптивних блоків та можливостей прототипування, що забезпечує високу швидкість роботи та дозволяє зберігати цілісність дизайн-

системи навіть у великих проєктах. Її хмарна архітектура, інтуїтивний інтерфейс, можливість колективного редагування та широкий набір функцій роблять Figma незамінною платформою як для новачків, так і для професійних дизайнерів. Використання цього середовища дозволяє скоротити час розробки, підвищити узгодженість роботи команди та забезпечити високу якість кінцевого продукту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G2. Top Design Software Products 2025. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.g2.com/best-software-companies/top-design (дата звернення: 06.11.2025).
2. Staiano F. Designing and Prototyping Interfaces with Figma: Learn essential UX/UI design principles by creating interactive prototypes for mobile, tablet, and desktop. – Packt Publishing Ltd, 2022.
3. Calonaci D. Designing User Interfaces: Exploring User Interfaces, UI Elements, Design Prototypes and the Figma UI Design Tool (English Edition). – Bpb Publications, 2021.

УДК 004.9

Р.С. Вдовиченко[1], Д.В. Іванов[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВПЛИВ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ

Анотація. У роботі проведено аналітичне дослідження впливу розвитку сучасних технологій на зміну ставлення програмістів до оптимізації програмного коду. Розглянуто основні причини втрати актуальності оптимізації, серед яких - зростання потужності апаратного забезпечення, поширення високорівневих мов програмування та комерційний тиск на швидкість розробки. Проаналізовано технічні, економічні та екологічні наслідки тенденції. Запропоновано системний і методологічний підхід до вирішення проблеми шляхом формування культури ефективного програмування та вдосконалення освітніх практик. Результати дослідження підкреслюють необхідність повернення оптимізації як ключового принципу програмної інженерії.

Ключові слова: *оптимізація коду, ефективність програмного забезпечення, алгоритмічна складність, культура програмування, продуктивність, енергоспоживання, програмна інженерія*.

Вступ. У перші десятиліття розвитку комп’ютерної техніки програмісти працювали в умовах суворих обмежень – мала кількість оперативної пам’яті, низька швидкодія процесорів та відсутність сучасних інструментів розробки змушували розробників ретельно продумувати кожен рядок коду. Оптимізація програмних рішень була не просто бажаною, а необхідною умовою працездатності систем, адже будь-яка неефективна інструкція могла суттєво знизити продуктивність або зробити програму непридатною для використання.

Однак із розвитком мікропроцесорних технологій, зростанням обсягів пам’яті та появою високорівневих мов програмування значення оптимізації

поступово відходить на другий план. Сучасні бібліотеки, фреймворки та інтегровані середовища розробки забезпечують надзвичайно швидке створення програмних продуктів, але водночас формують у програмістів хибне уявлення про необмеженість апаратних ресурсів. Унаслідок цього зростає кількість програмного забезпечення з надмірною складністю, дублюванням функцій, нераціональним використанням пам'яті та енергоспоживанням.

Особливої актуальності проблема оптимізації набуває в умовах розвитку мобільних і вбудованих систем, хмарних сервісів та обчислень на периферії (edge computing), де обмеження ресурсів залишаються критичними. У таких середовищах неефективність програмного коду безпосередньо впливає на продуктивність, автономність пристроїв та витрати на інфраструктуру.

Крім того, з огляду на глобальні тенденції до зменшення енергоспоживання та екологічної сталості IT-галузі, оптимізація програмного забезпечення розглядається вже не лише як інженерна, але й як стратегічна задача. Енергоефективне програмування сприяє зниженню вуглецевого сліду дата-центрів і підвищенню загальної ефективності використання обчислювальних ресурсів.

Таким чином, сучасний етап розвитку програмної інженерії характеризується необхідністю переосмислення підходів до оптимізації. Вона має стати не наслідком апаратних обмежень, як це було раніше, а свідомим елементом проектування, спрямованим на підвищення ефективності, стабільності та екологічності програмних систем.

Постановка задачі. Метою цієї роботи є дослідження тенденції зниження уваги до оптимізації програмного коду серед сучасних розробників та виявлення шляхів підвищення ефективності програмного забезпечення без зниження швидкості розробки. Для досягнення визначеної мети в роботі вирішуються такі завдання:

- проаналізувати історичні передумови та причини зміни ставлення до оптимізації;
- визначити основні фактори, що сприяють зменшенню уваги до ефективності коду;
- дослідити наслідки цієї тенденції для продуктивності, вартості та екологічності сучасних систем;
- запропонувати підходи, що дозволяють поєднати швидкість розробки з оптимальністю виконання програм;
- сформулювати рекомендації для підготовки майбутніх фахівців з урахуванням сучасних технологічних умов.

Основний зміст роботи. Основною причиною зниження уваги до оптимізації є стрімке зростання обчислювальних потужностей апаратного забезпечення. Те, що кілька десятиліть тому вимагало тижнів або місяців ручного налаштування та оптимізації на рівні асемблера, сьогодні реалізується кількома рядками коду на мовах високого рівня, таких як Python, JavaScript чи

C#. Висока швидкодія процесорів, збільшення обсягів оперативної пам'яті та поява твердотільних накопичувачів створюють ілюзію надлишковості ресурсів. У результаті розробники часто не відчувають потреби у глибокому аналізі ефективності алгоритмів, адже навіть неоптимізовані рішення демонструють прийнятну продуктивність на сучасних машинах. Такий підхід формує культуру «зайвої розкоші» у використанні ресурсів, коли головним критерієм успішності вважається працездатність, а не ефективність програмного продукту. Графік залежності потужності персональних комп'ютерів від зростання вимог програмного забезпечення наведено на рис. 1, де чітко простежується тенденція випередження апаратних можливостей над рівнем оптимізації програм.

Другою вагомою причиною є поширення високорівневих фреймворків, інтерпретаторів і готових бібліотек, що приховують складні низькорівневі процеси під простими інтерфейсами. Використання таких інструментів значно підвищує швидкість розробки та зменшує поріг входу у професію, але водночас віддаляє програміста від розуміння внутрішніх механізмів виконання коду. Розробник перестає контролювати критичні аспекти продуктивності – управління пам'яттю, ефективність обчислень, синхронізацію потоків тощо. Як наслідок, оптимізація сприймається не як невід'ємна частина інженерного процесу, а як факультативне завдання, яке можна виконати «за необхідності». Це призводить до накопичення технічного боргу та зниження загальної якості програмних систем.

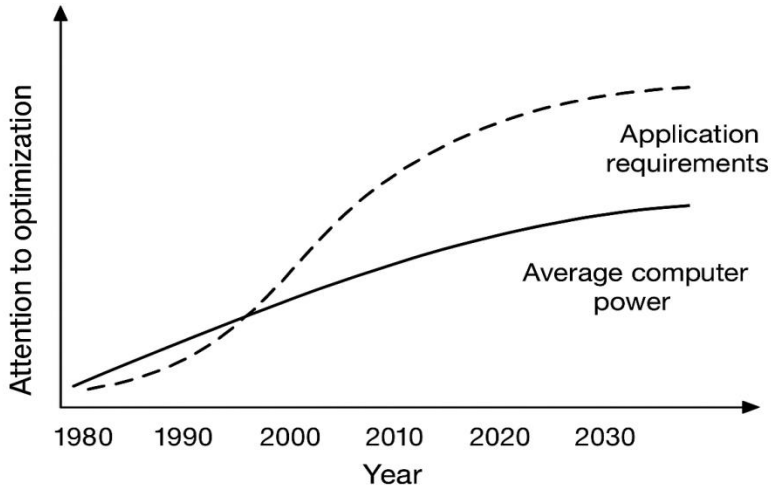


Рис.1. Графік залежності потужності ПК до вимог програм

Третім чинником є комерційний тиск на швидкість розробки. IT-індустрія все більше орієнтується на показник time-to-market – мінімізацію часу між ідеєю продукту та його виходом на ринок. У таких умовах головним пріоритетом стає функціональність і задоволення вимог замовника, тоді як ефективність коду сприймається як вторинне завдання. Оптимізаційні етапи часто відкладаються на пізніші фази розробки, але в реальних проєктах це «потім» зазвичай не настає через обмежені ресурси, дедлайни та комерційні ризики. У результаті

формується культура «швидкої розробки», що призводить до накопичення технічного боргу, зниження масштабованості систем і підвищення вартості їх подальшого супроводу.

Додатковим фактором, який впливає на ситуацію, є недостатня увага до питань оптимізації у процесі підготовки фахівців. У більшості сучасних освітніх програм з програмної інженерії акцент зміщується на освоєння фреймворків і прикладних технологій, тоді як курси з алгоритмічної оптимізації, структур даних та низькорівневих аспектів виконання програм часто зведені до мінімуму. Це призводить до того, що молоді розробники володіють сучасними інструментами, але не завжди розуміють принципи ефективної роботи програмних систем.

У сукупності зазначені чинники формують тенденцію, коли програмна інженерія поступово віддаляється від свого початкового принципу – раціональності у використанні ресурсів. Проте в умовах сучасних технологічних викликів, зокрема розвитку мобільних, хмарних і вбудованих систем, питання оптимізації знову набуває актуальності. Оптимальний код стає не лише технічною, а й економічною та екологічною необхідністю, оскільки дозволяє зменшити споживання енергії, підвищити швидкодію систем і забезпечити стабільність їх функціонування в умовах обмежених ресурсів.

Модель оцінки важливості оптимізації. Для формалізації залежності між ресурсами системи та необхідністю оптимізації введемо поняття коефіцієнта важливості оптимізації K_{opt} (1):

$$K_{opt} = \frac{R_c}{R_a} * \frac{T_c}{T_a} \quad (1)$$

де R_c – споживання ресурсів поточним рішенням,

R_a – допустиме споживання ресурсів,

T_c – час виконання програми,

T_a – бажаний або нормативний час виконання.

Якщо $K_{opt}>1$, система працює повільніше або споживає більше ресурсів, ніж дозволено – оптимізація є необхідною.

Якщо $K_{opt}\approx 1$, продуктивність задовільна, але можливі локальні поліпшення. Якщо $K_{opt} <1$, оптимізація не є пріоритетною, оскільки код перевищує очікування.

Для комплексної оцінки доцільності оптимізації введемо індекс ефективності розробки E_d (2)

$$E_d = \frac{Q_p}{C_t + C_o} \quad (2)$$

де Q_p – приріст продуктивності після оптимізації,

C_t – витрати часу на розробку,

C_o – витрати на оптимізацію.

Цей показник дозволяє визначити, чи доцільно інвестувати час у покращення коду. Якщо $E_d > 1$, оптимізація виправдана економічно й технічно.

У процесі аналізу виділено такі групи факторів:

- Технічні: обладнання, структура системи, мова програмування.
- Організаційні: строки виконання, бюджет проєкту, політика компанії.
- Людські: рівень компетенції програмістів, досвід роботи з профайлерами, культура розробки.

Кожен із факторів має свою вагу важливості W_i , яку можна оцінити експертним методом (3):

$$W_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^{n} r_i} \quad (3)$$

де r_i – експертна оцінка значущості і-го фактора.

Загальна оцінка необхідності оптимізації визначається як (4):

$$S = \sum_{i=1}^{n} w_i * k_i \quad (4)$$

де k_i – оцінка рівня неефективності за відповідним фактором. Якщо S>1, оптимізаційні дії є критично необхідними.

Запропонована модель може бути використана у системах контролю якості коду, а також у процесі прийняття рішень при плануванні спринтів у гнучких методологіях (Agile, Scrum). Вона допомагає формалізувати поняття «оптимізація за необхідністю» та визначити, коли її варто здійснювати з точки зору витрат і вигоди.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні формалізованої моделі кількісної оцінки доцільності оптимізації програмного коду, що ґрунтується на введенні коефіцієнта важливості оптимізації та індексу ефективності розробки. Запропонований підхід забезпечує можливість комплексного аналізу взаємозв’язку між технічними, організаційними та людськими факторами, які впливають на ефективність програмного забезпечення. На відміну від існуючих підходів, модель дозволяє здійснювати кількісне визначення потреби в оптимізаційних діях на ранніх етапах життєвого циклу програмного продукту, що сприяє підвищенню раціональності управлінських рішень у процесі розробки та планування програмних проєктів.

Висновки. З розвитком технологій програмісти поступово втратили необхідність замислюватися про ефективність свого коду, оскільки сучасне апаратне забезпечення компенсує більшість помилок дизайну та нераціональних рішень. Проте надмірна залежність від потужності обчислювальних ресурсів призводить до низки проблем, серед яких – зниження продуктивності систем у масштабованих середовищах, підвищення вартості експлуатації програмних

продуктів, а також збільшення енергоспоживання, що негативно впливає на екологічну стійкість IT-інфраструктур.

Результатом проведеного аналізу стала розроблена модель кількісної оцінки доцільності оптимізації, яка враховує баланс між витратами часу, ресурсів і потенційним приростом продуктивності. Використання запропонованих коефіцієнтів важливості оптимізації та ефективності розробки дає змогу формалізувати процес ухвалення рішень щодо оптимізаційних дій і застосовувати їх у практиці управління програмними проєктами.

Застосування моделі сприятиме підвищенню раціональності процесів розробки, формуванню культури енергоефективного програмування та зменшенню залежності від надлишкових обчислювальних ресурсів. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі за рахунок інтеграції метрик складності алгоритмів і автоматизованих інструментів оцінки ефективності, що дозволить підвищити точність прогнозування доцільності оптимізацій у реальних проєктних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. McConnell S. Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction. – 2nd ed. – Microsoft Press, Redmond, 2014. – 835–860 с.
2. Fowler M. Refactoring: Improving the Design of Existing Code. – 2nd ed. – Addison-Wesley, Boston, 2018. 25–40 с.
3. Martin R.C. Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship. – Prentice Hall, New Jersey, 2011. – 335–354 с.
4. Sedgewick R., Wayne K. Algorithms. – 4th ed. – Addison-Wesley, Boston, 2011. – 168–203 с.
5. Dean J., Barroso L.A. The Tail at Scale. // Communications of the ACM. – Vol. 56, No. 2, 2013. - 74–80 с.
6. Nir Menachemi. “The Cost of Inefficiency in Modern Software Systems.” // IEEE Software Engineering Journal, Vol. 38, No. 6, 2021. – 48–55 с.

УДК 004.4:004.738.5:659.3

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], М.О. Алексєєв[1], Б.В.Строй[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

SMARTY TEMPLATE ENGINE – СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО РОЗДІЛЕННЯ ЛОГІКИ ТА РОЗМІТКИ В PHP

Анотація. У роботі розглянуто можливості шаблонізатора Smarty Template Engine як сучасного інструменту розділення бізнес-логіки та розмітки у вебдодатках. Наведено переваги використання Smarty, його синтаксичні особливості та застосування у різних проектах. Проведено порівняння з іншими шаблонізаторами (Blade, Twig, Quicky).

Ключові слова: *Smarty, шаблонізатор, PHP, MVC, Twig, Blade, Quicky, фронтенд*.

Вступ. Веброзробка розвивається надзвичайно швидко, а нові фреймворки, бібліотеки та оновлення PHP постійно змінюють підходи до створення вебдодатків. В умовах такої динаміки особливо важливим є чітке розділення бізнес-логіки та розмітки вебсторінок. Одним із інструментів для цього є Smarty Template Engine – шаблонізатор, який компілює HTML, CSS та JavaScript у чистий кешований PHP-код. Найчастіше шаблонізатор Smarty використовують у архітектурах MVC ніж в монолітних або блокчейнових архітектурах. Це дозволяє спростити підтримку великих проектів.

Основний зміст роботи. Smarty – це універсальний шаблонізатор, якій підтримує масштабовані проекти, має потужну систему плагінів і розширень. Головна ідея використання Smarty полягає у чіткому розділенні бізнес-логіки та розмітки у вебдодатках. Це дозволяє підтримувати чисту структуру коду і спрощує масштабування проектів. За допомогою Smarty розробник може формувати інтерфейси з повторно використовуваними компонентами, автоматично кешувати шаблони та контролювати відображення даних без змішування логіки. До загальних переваг використання шаблонізатора Smarty можна віднести:

- автокешування – шаблони компілюються один раз, що прискорює роботу;
- гнучкість – легко інтегрується у MVC-структуру;
- масштабованість – підтримка плагінів, модифікаторів, власних функцій;
- безпеку – автоматичне екранування захищає від XSS та HTML-ін’єкцій;
- модульність – повторне використання компонентів в коді.

Використання шаблонізатора Smarty в різних проектах може бути реалізовано в наступних практичних кейсах:

1. Інтернет-магазини (відображення списків товарів, робота з фільтрами, пагінацією та кешуванням окремих блоків). Smarty дозволяє легко керувати повторюваними елементами інтерфейсу та прискорювати завантаження сторінок.

2. Теми та шаблони для CMS або “white-label” продуктів (одна кодова база може обслуговувати кілька брендів або проектів одночасно, забезпечуючи гнучкість і можливість легко змінювати вигляд окремих частин сайту).
3. Персональні кабінети SaaS (дашборди з різними ролями та правами доступу користувачів). Smarty спрощує організацію умовного відображення елементів інтерфейсу для різних користувачів.
4. Генерація email-листів (шаблони для транзакційних повідомлень, замовлень та відновлення пароля). Smarty допомагає розділяти оформлення листів у HTML та текстовому форматі, забезпечуючи повторне використання загальних блоків.
5. Мультимовність та локалізація (підтримка інтерфейсів з перекладами та форматами дат і валют). Smarty дозволяє легко адаптувати контент під різні мови і регіональні стандарти.
6. A/B-тестування в UI (показ різних версій одного блоку для проведення експериментів і збору аналітики). Smarty допомагає легко керувати варіантами відображення.
7. Компонентний підхід у великих проектах (багаторазові елементи інтерфейсу, такі як кнопки, меню або картки, можна створювати централізовано і повторно використовувати у різних частинах сайту).
8. Серверний рендеринг для SPA/SSR гібридів (перший рендер HTML із вбудованими даними для фронтенду, що забезпечує швидке завантаження сторінок і покращує SEO).
9. Оптимізація продуктивності через кешування окремих блоків. Smarty дозволяє зберігати часто повторювані елементи сторінки в кеші, що значно прискорює роботу сайту.
10. Рефакторинг легасі-проектів (перенесення бізнес-логіки у PHP, залишаючи у шаблонах лише розмітку з мінімальними вставками даних, що робить код чистішим і легшим для підтримки).

Синтаксис є простий та зрозумілий та є подібним до інших шаблонізаторів, таких як Blade, Twig, Quicky (рис. 1).

Blade:

```
<?php
return view('index', [    Undefined function 'view'.
    'title' => 'Ласкаво просимо до нашого магазину!',
    'message' => 'У нас наступний асортимент:',
    'products' => ['Смартфони', 'Ноутбуки', 'Навушники']
]);
```

Quicky:

```
require 'libs/quicky.php';
$quicky = new Quicky();    Undefined type 'Quicky'.

// Передаємо змінні у шаблон
$quicky->assign('title', 'Ласкаво просимо до нашого магазину!');
$quicky->assign('message', 'У нас наступний асортимент:');
$quicky->assign('products', ['Смартфони', 'Ноутбуки', 'Навушники']);

// Відображаємо шаблон
$quicky->display('index.tpl');
```

Twig:

```php
<?php
return $this->render('index', [
    'title' => 'Ласкаво просимо до нашого магазину!',
    'message' => 'У нас наступний асортимент:',
    'products' => ['Смартфони', 'Ноутбуки', 'Навушники']
]);
```

Smarty:

```php
<?php
require 'libs/Smarty.class.php';

$smarty = new Smarty();

// Передаємо змінні у шаблон
$smarty->assign(tpl_var: 'title', value: 'Ласкаво просимо до нашого магазину!');
$smarty->assign(tpl_var: 'message', value: 'У нас наступний асортимент:');
$smarty->assign(tpl_var: 'products', value: ['Смартфони', 'Ноутбуки', 'Навушники']);

// Відображаємо шаблон
$smarty->display(template: 'index.tpl');
```

Рис. 1. Приклад використання різних шаблонізаторів у коді PHP

Blade – потужний інструмент у межах фреймворку Laravel, проте обмежений поза ним. Twig має строгий синтаксис, орієнтований на безпеку, але в порівнянні зі Smarty менше гнучкий. Quicky – швидкий і легкий, однак має обмежену розширюваність для складних проектів. Завдяки цьому, у Smarty можна гнучко поєднувати HTML із шаблонними тегами. (рис. 2).

```
<h1>{$title}</h1>

<p>{$message}</p>

<ul>
    {foreach $products as $product}
        <li>{$product}</li>
    {/foreach}
</ul>
```

Рис. 2. Зразок синтаксису шаблонізатора Smarty

Результат роботи шаблонізатору на сторінці користувача наведено на рис. 3.

Ласкаво просимо до нас в магазин!

у нас є наступний асортимент:

- Смартони
- Ноутбуки
- Навушники

Рис. 3. Відображення результату роботи шаблонізаторів
на сторінці користувача

Висновки. Smarty Template Engine є потужним і гнучким інструментом для розділення логіки та розмітки у вебдодатках. На відміну від інших

шаблонізаторів, він має ширші можливості розширення та краще підходить для великих і складних систем. Його використання дозволяє підвищити безпеку, спростити структуру коду та забезпечити повторне використання компонентів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Smarty Documentation [електронний ресурс]. URL: https://smarty-php.github.io/ smarty/stable/ (дата звернення: 20.10.2025).
2. Twig Documentation [електронний ресурс]. URL: https://twig.symfony.com/doc (дата звернення: 20.10.2025).
3. Laravel Blade Templates [електронний ресурс]. URL: https://laravel.com/docs/ 12.x/blade (дата звернення: 20.10.2025).
4. Quicky Template Engine [електронний ресурс]. URL: https://github.com/kakserpom/ quicky/wiki/Мануал (дата звернення: 20.10.2025).

УДК 004.415.3:681.6

Б.І. Мороз[1], В.В. Єрмаков[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЄЮ ОБРОБКИ ПОВІДОМЛЕНЬ В OLAP СИСТЕМАХ

Анотація. У цій публікації описано та обґрунтовано дослідницьку програму з пріоритетної обробки повідомлень для OLAP-pipeline'ів під час сплесків навантаження. Ми пропонуємо cross-layer «дисципліну контрольованого обслуговування», яка синхронізує прийом брокерів, ETL micro-batching, планування запису OLAP та заповнення в непікові години. Ми формалізуємо проблему критичного за часом прийому, де цінність інформації зменшується із затримкою. Щоб дізнатися про операційні пріоритети з фактичного впливу рішень, метод базується на традиційному критерії обробки інформації «цінність і старіння» та розширений за допомогою рейтингу машинного навчання [1,2,3]. Ми надаємо визначення проблеми, план роботи, таксономію терміновості для процедур ETL та очікувані практичні та наукові результати.

Ключові слова: *OLAP, ETL, планування прийому, контрольована дисципліна обслуговування, цінність інформації, старіння, визначення пріоритетів, терміни, машинне навчання.*

Вступ та актуальність. У цій публікації описано та обґрунтовано дослідницьку програму з пріоритетної обробки повідомлень для OLAP-конвеєрів під час сплесків навантаження. Ми пропонуємо cross-layer «дисципліну контрольованого обслуговування», яка синхронізує допуск брокерів, ETL micro-batching, планування запису OLAP та заповнення в непікові години. Ми формалізуємо проблему критичного за часом прийому, де цінність інформації зменшується із затримкою. Щоб дізнатися про операційні пріоритети з фактичного впливу рішень, метод базується на традиційному критерії обробки

інформації «цінність і старіння» [1,2] і розширений за допомогою рейтингу машинного навчання. Ми надаємо визначення проблеми, план роботи, таксономію терміновості для процедур ETL та очікувані практичні та наукові результати.

Не існує комплексної дисципліни прийому даних, що враховує цінність та терміни, спеціально розробленої для OLAP-конвеєрів, яка б спільно керувала допуском брокерів, розмірами мікропартій ETL, порядком запису в приймач та тиском злиття у фоновому режимі [4,5]. Ця прогалина є мотивацією для програми дослідження, заснованої на традиційних концепціях «цінності та старіння» та розширеної за допомогою навчання пріоритетності [6,7].

Постановка проблеми. Розглядаємо потік повідомлень (або мікропакетів), пронумерованих індексом *i*. Кожне має:

- розмір s_i (у байтах чи рядках),
- вагу цінності $v_i \geq 0$ (бізнес-користь),
- дедлайн/SLA d_i (відносно часу створення або надходження),
- клас/тему k_i (наприклад, *purchase*, *ad-view*, *session*, *debug*).

Нехай t_i – час фіксації (commit) у OLAP-сховищі. Вартість «старіння» (staleness) відповідає принципу цінності/старіння Свірідова–Мороза [1]: корисність інформації зменшується з часом; приймаємо опуклу модель штрафу за запізнення [13,14]:

$$C_i = v_i * \max(0, t_i - d_i)^2, a \geq 1 \quad (1)$$

Пропускна здатність інжесту $\mu(t)$ і обмежена й змінюється в часі; інтенсивність надходжень $\lambda(t)$ – «пікова». **Мета:** знайти онлайн-політику планування/допуску π , що мінімізує

$$\sum_i C_i \quad (2)$$

за обмежень на пропускну здатність, справедливість між орендарями (tenants), надійність та операційні вимоги (ідемпотентність, дедуплікація, бюджети злиттів).

Теоретичні засади: «Цінність і старіння» та керована дисципліна обслуговування. Ми розглядаємо інформацію як сутність, чия цінність зменшується зі «старінням», згідно з В. Свірідовим і Б. Морозом [1,2]; обробка має плануватись так, щоб за ресурсних обмежень максимізувати збережену цінність. Це переводиться у керовану дисципліну обслуговування, де впорядкування та допуск навантажень регулюються й динамічно змінюються за станом системи, дедлайнами та виміряною цінністю [6,7,12]. Для OLAP-інжесту це означає:

- пріоритизацію черг за цінністю * терміновістю,

- налаштування кванта обслуговування (розміри мікропакетів) і швидкостей (token-bucket),
- відтермінування або приблизну обробку низькоцінних навантажень під час перевантаження,
- формування фонового обслуговування (злиття/компакції) на непікові вікна.

Це узагальнює класичні дисципліни (FIFO, сувора пріоритезація, EDF), додаючи керування зворотним зв'язком і навчувані сигнали пріоритизації при дотриманні критеріїв цінності та старіння даних.

Контекст ETL та таксономія терміновості. Практичний OLAP-конвеєр (напр., Kafka -> ETL consumers -> ClickHouse) має окремі класи терміновості:

- Високий пріоритет (HP): покупки, статус оплат, призначення/експозиція A/B, антифрод-події, ключові лічильники KPI.
- Середній пріоритет (MP): майже-реальні агрегати сесій, оновлення ретеншну D0/D1, виручка за когортами.
- Низький пріоритет (LP): багата телеметрія, debug-логи, повні «сирі» навантаження для офлайн-аналізу.

Етапи ETL – extract (споживання з брокера), transform (дедуплікація, збагачення, вікна), load (пакетні вставки, злиття) – кожен додає латентність і конкуренцію за ресурси. Піки виникають через діурнальні патерни та накладання обслуговування (наприклад, злиття, що збігаються з інжестом) [10,11]. Без керування дані HP порушують SLA, тоді як низькоцінні потоки споживають пропускну здатність і бюджети злиттів [4,5,10].

Запропонований підхід. Крос-шарова керована дисципліна обслуговування

1. Допуск і черги. Розділяємо за пріоритетами (HP/MP/LP) або підтримуємо єдину чергу з пер-елементними балами. Застосовуємо token-bucket на клас і зважене справедливе обслуговування (WFQ), щоб запобігти голодуванню [6,7,12].
2. ML-оцінка важливості. Для кожного елемента i, обчислюємо

$$score_i = \mathrm{f}\theta(x_i) * \mathrm{g}(slack_i)/size_i \quad (3)$$

де fθ прогнозує вплив на рішення (ймовірність, що елемент вплине на алерти/дашборди в певному горизонті), g(·) зростає зі зменшенням запасу до дедлайну (slack), а $size_i$ штрафує дорогі пакети (принцип WSJF) [7]. Старт – градієнтні бустинги; розширення – learning-to-rank.

3. Мікропакетування з урахуванням дедлайнів. Для HP – менші партії, щоб зменшити commit-латентність; для MP/LP – укрупнення партій для підвищення пропускної здатності [12].
4. Плавна деградація. Під час перевантажень застосовуйте *approx-first, exact-later*: запис скетчів/агрегатів для LP, збереження raw в об'єктне сховище та бекфіл точних рядків у «долинах» навантаження [9,10].

5. Формування злиттів/компакцій (OLAP-сховище). Обмежуйте паралельні злиття, резервуйте фоновий бюджет для HP-таблиць; важкі злиття переносіть на години мінімального навантаження [10,11].

Метрики та обмеження.

Пріоритетно зважене запізнення:

$$\sum v_i max(0, t_i - d_i). \text{ [1,2,3]} \quad (4)$$

HP SLO hit-rate, довжина черги, частка втрат, write amplification, CPU/I/O на 1 ГБ інжесту. [12]

Справедливість: нижні межі пропуску для MP/LP, щоб уникнути голодування; квоти орендарів. [12]

Робочий план

1. Література й модель. Формалізувати вартість старіння та керовану дисципліну; відобразити на OLAP-інжест; визначити метрики оцінювання.

2. Дані та базові методи. Побудувати стенд повторного програвання піків. Реалізувати FIFO, статичні пріоритети та EDF із фіксованим мікропакетуванням.

3. ML-скорер. Означити мітки: (a) зважена вартість запізнення; (b) індикатор «використано протягом W хвилин» із логів запитів/алертів. Навчити LightGBM/LambdaMART; відкалібрувати бали.

4. Крос-шаровий контролер. Інтегрувати допуск, дедлайн-орієнтоване пакування та формування злиттів. Реалізувати approx-first, exact-later для LP-топіків.

5. Експерименти. Порівняти політики на відтворених піках: SLO-хітрейт (HP), зважене запізнення, беклог/втрати, використання ресурсів. Абляції: з/без ML; з/без формування злиттів.

6. Валідація та підготовка тексту. Чутливість до помилкових v_i, стійкість до дрейфу.

Очікуванні результати

Наукові.

- Формальна модель планування OLAP-інжесту, заснована на критерії «цінність/старіння».
- Керована дисципліна обслуговування, що об’єднує допуск, пакування, порядок записів у сховище та керування обслуговуванням.
- ML-пріоритизатор, навчений на сигналах впливу на рішення (алерти/дашборди), а не лише на статичних класах.
- Підтвердження, що за фіксованих ресурсів зменшується зважене запізнення і зростає HP SLO hit-rate порівняно з FIFO/EDF.

Практичні.

- Розгортуваний контролер інжесту (broker -> ETL -> OLAP) із запобіжниками (квоти, анти-starvation).
- Операційні «плейбуки» для згладжування піків: політики пакування, бюджети злиттів, стратегії бекфілу.

- Відтворюваний стенд оцінювання та набори даних для подальших порівнянь.

Висновок. Ця робота розв'язує поширений, але недоформалізований бар'єр в OLAP-аналітиці: не всі дані однаково цінні в часі, і однакове ставлення до них марнує ресурс саме тоді, коли компанії потрібні своєчасні дані. Ми прагнемо до принципового, кількісно вимірюваного покращення своєчасності та стійкості аналітики у піки – без додаткового «заліза» – шляхом розширення архітектури керованою дисципліною обслуговування та навченою пріоритизацією, спираючись на критерій цінності й старіння. Запропонована стратегія дає як теоретичні результати, так і практичне рішення, придатне для реальних виробничих конвеєрів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Свірідов В., Мороз Б. Організація процесів обробки інформації за критеріями цінності та старіння в автоматизованих системах управління / Основа – Харків, 1992. – 112 с.
2. Мороз Б. І. Методи і засоби організації процесів обробки інформації за критеріями цінності та старіння в системах автоматизованого управління та інформаційного обслуговування: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Дніпропетровський державний університет, Дніпропетровськ, 1992 р. 358 с.
3. Kaul S., Yates R., Gruteser M. Real-time status: How often should one update? / IEEE INFOCOM – Orlando, 2012.
4. Abadi D. J., et al. Aurora: A New Model and Architecture for Data Stream Management / VLDB Journal – 2003.
5. Abadi D., Ahmad Y., et al. The Design of the Borealis Stream Processing Engine / CIDR – Asilomar, 2005.
6. Liu C. L., Layland J. W. Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard-Real-Time Environment / Journal of the ACM – 1973.
7. Smith W. E. Various optimizers for single-stage production / Naval Research Logistics Quarterly – 1956.
8. Mao H., Alizadeh M., Menache I., Kandula S. Resource Management with Deep Reinforcement Learning / ACM HotNets – Atlanta, 2016.
9. Cormode G., Muthukrishnan S. An improved data stream summary: The Count–Min Sketch and its applications / Journal of Algorithms – 2005.
10. Flajolet P., Fusy É., Gandouet O., Meunier F. HyperLogLog: the analysis of a near-optimal cardinality estimation algorithm / AOFA – 2007.
11. O'Neil P., Cheng E., Gawlick D., O'Neil E. The Log-Structured Merge-Tree (LSM-tree) / Acta Informatica – 1996.
12. Pinedo M. L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems / Springer – New York, 2016.

УДК 004.8

М.Г. Бердник[1], Р.І. Яшкін[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ХВОРОБИ ПАРКІНСОНА НА ОСНОВІ АКУСТИЧНИХ ТА SSL-ОЗНАК СПОНТАННОГО УКРАЇНОМОВНОГО МОВЛЕННЯ

Анотація. Описано підхід до класифікації хвороби Паркінсона та здорового контролю за короткими фрагментами спонтанного українського мовлення. На збалансованому корпусі з 38 мовців порівняно традиційні акустичні статистики (MFCC, jitter, shimmer, F0) та сучасні самонавчувані вбудовування OpenL3, також використано лінійний SVM із leave-one-subject-out валідацією. Показано, що акустичні дескриптори забезпечують стійку точність (AUROC≈0,74–0,75) за обмеженої вибірки, тоді як SSL-представлення виявляють чутливість до умов запису та потребують доменної адаптації.

Ключові слова: *робастність, хвороба Паркінсона, машинне навчання, спонтанне мовлення, акустичні ознаки, самонавчувані представлення, LOSO.*

Вступ. Хвороба Паркінсона є прогресуючим нейродегенеративним розладом із характерною гіпокінетичною дизартрією – зниженою гучністю, монотонною інтонацією та неточною артикуляцією [1]. Ці зміни можуть слугувати ранніми біомаркерами, що обумовлює інтерес до автоматичного аналізу мовлення. Сучасні дослідження переходять від структурованих завдань до спонтанного мовлення, але цей підхід ускладнюється малими вибірками, різними умовами запису та ризиком перенавчання, тому потребує суворих схем валідації та робастних методів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші роботи показали, що дисфонічні маркери на утримуваних голосних дозволяють точно відокремлювати хворих від здорових [3]. Створення еталонного датасету Sakar для 20 ХП та 20 ЗК дало змогу порівнювати моделі [4]. Останні огляди відзначають важливість переходу до спонтанного мовлення та використання робастних ознак і схем валідації [5]. Крім традиційних акустичних статистик (MFCC, jitter, shimmer, F0), дослідники застосовують великорозмірні SSL-вбудовування OpenL3 [6]. Проте їх перевага над класичними дескрипторами у невеликих вибірках ще не доведена.

Мета дослідження. Метою є оцінка ефективності традиційних акустичних ознак та SSL-представлень для класифікації ХП проти ЗК за спонтанним мовленням українською. Потрібно визначити, які ознаки забезпечують стабільну робастність за умов малої вибірки та значної варіативності каналів і чи перевищують SSL-вбудовування ефективність компактних акустичних дескрипторів.

Основний зміст роботи. Перший етап дослідження полягав у формуванні корпусу даних. До вибірки увійшли 38 україномовних спікерів: 19 пацієнтів з діагнозом хвороби Паркінсона та 19 здорових контролів, причому у кожній групі було по 11 чоловіків та 8 жінок для мінімізації впливу відмінності висоти голосу.

Для кожного мовця з публічно доступних відео було відібрано один безперервний фрагмент спонтанного мовлення тривалістю 15–20 секунд. Мітки «ХП» базувалися на описах відео чи висловлюваннях, що прямо підтверджували діагноз, «ЗК» обиралися серед інтерв'ю без згадок про захворювання. Особисті дані не збиралися, і фрагменти використовувалися лише для аналізу, що відповідає етичним вимогам.

На другому етапі виконувалася попередня обробка аудіосигналів. За допомогою FFmpeg відрізки були обрізані так, щоб не захоплювати гучних шумів, музики, після чого гучність нормалізували відповідно до стандарту EBU R128 [7]. Щоб дослідити вплив нормалізації, кожний кліп аналізували у двох варіантах – базовому (без нормалізації) та зі стандартним вирівнюванням рівня. Фрагменти були обрізані так, щоб зберегти природне спонтанне мовлення і не включати мовні задачі, сценарії або накладання голосів інших осіб, сторонніх шумів, тощо.

Третій етап стосувався виділення ознак. Розглядалися три набори:

– компактні акустичні статистики, що включали середні й дисперсії 13 MFCC, показники jitter, shimmer і середню частоту основного тону F0;

– 512-вимірні SSL-вбудовування, отримані моделлю OpenL3, яка навчається на великому корпусі аудіоданих для формування універсальних представлень [6];

– конкатенація акустичних і SSL-ознак, що дозволяє поєднати переваги обох підходів.

Усі вектори ознак проходили медіанну імпутацію та стандартизацію.

Четвертий етап передбачав побудову й оцінювання моделей. Як базовий класифікатор використовувався лінійний SVM. Щоб уникнути витоку інформації про мовців між тренувальною й тестовою вибірками, застосувано схему валідації leave-one-subject-out [8] для кожного мовця модель тренували на решті 37 суб'єктах і тестували на одному відкладеному. Ефективність вимірювалась за площею під ROC-кривою (AUROC). Додатково проводились бутстрепні оцінки та пермутаційні тести для перевірки статистичної значущості. Результати показали, що акустичні статистики забезпечують AUROC≈0,74–0,75 і стабільніші, ніж SSL-вбудовування, незалежно від нормалізації гучності. SSL-репрезентації та конкатенація не показали переваг і виявилися чутливими до каналових ефектів, що підкреслює потребу у подальшій доменній адаптації.

Висновки. Доведено, що на невеликому корпусі спонтанного мовлення українською акустичні ознаки у поєднанні з лінійним SVM та суворою LOSO-валідацією забезпечують робастну класифікацію хвороби Паркінсона і перевершують великорозмірні SSL-вбудовування. Це підтверджує важливість використання інтерпретованих акустичних дескрипторів при роботі з малими даними. SSL-репрезентації чутливі до каналових ефектів, у подальших дослідженнях варто зосередитись на доменно-адверсаріальному навчанні, компенсації спотворень та збільшенні розмірів навчального корпусу. Розширення набору даних та впровадження аугментацій дадуть змогу підвищити

точність моделей і сприятимуть розробці надійних інструментів скринінгу ХП, що можна було би потенційно використовувати у клінічній практиці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Atalar M. S., Oguz O., Genc G. Hypokinetic Dysarthria in Parkinson's Disease: A Narrative Review. *Sisli Etfal Hastanesi tip bulteni*. 2023. Vol. 57, no. 2. P. 163–170. DOI: 10.14744/SEMB.2023.29560.
2. Hossain M. A., Traini E., Amenta F. Machine Learning Applications for Diagnosing Parkinson's Disease via Speech, Language, and Voice Changes: A Systematic Review. *Inventions*. 2025. Vol. 10, no. 4. Art. 48. DOI: 10.3390/inventions10040048.
3. Tsanas A., Little M. A., McSharry P. E., Spielman J., Ramig L. O. Novel speech signal processing algorithms for high-accuracy classification of Parkinson's disease. *IEEE transactions on biomedical engineering*. 2012. Vol. 59, no. 5. P. 1264–1271. DOI: 10.1109/TBME.2012.2183367.
4. Sakar B. E., Isenkul M. E., Sakar C. O., Sertbas A., Gurgen F., Delil S., Apaydin H., Kursun O. Collection and analysis of a Parkinson speech dataset with multiple types of sound recordings. *IEEE journal of biomedical and health informatics*. 2013. Vol. 17, no. 4. P. 828–834. DOI: 10.1109/JBHI.2013.2245674.
5. Li Y., Zhang X., Wang P., Zhang X., Liu Y. Insight into an unsupervised two-step sparse transfer learning algorithm for speech diagnosis of Parkinson's disease. *Neural computing & applications*. 2021. Vol. 33, no. 15. P. 9733–9750. DOI: 10.1007/s00521-021-05741-0.
6. Cramer A. L., Wu H.-H., Salamon J., Bello J. P. Look, listen, and learn more: Design choices for deep audio embeddings. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2019)*. 2019. P. 3852–3856. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8682475.
7. European Broadcasting Union. *EBU R 128: Loudness Normalisation and Permitted Maximum Level of Audio Signals*. Geneva: EBU, 2014. URL: https://tech.ebu.ch/publications/r128.
8. Ojala M., Garriga G. C. Permutation tests for studying classifier performance. *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM 2009)*. 2009. P. 908–913. DOI: 10.1109/ICDM.2009.108.

УДК 658.787:004.451.5:004.89

С.О. Мірошниченко[1], В.І. Мірошниченко[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ АДАПТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ СЕРВІСУ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація. Запропоновано методологію адаптивного визначення цільового рівня сервісу на основі нечіткої логіки для систем управління запасами. Розроблений підхід забезпечує автоматичне формування бази нечітких правил з історичних даних шляхом застосування алгоритмів машинного навчання замість експертних оцінок, що забезпечує об'єктивність та адаптивність системи до специфіки конкретного підприємства.

Ключові слова: *управління запасами, нечітка логіка, машинне навчання, система нечіткого виведення, алгоритм C4.5, адаптивне управління, оптимізація запасів.*

Вступ. В умовах динамічного бізнес-середовища актуалізується проблема адаптивного управління запасами з урахуванням множинних факторів невизначеності. Важливою функцією систем управління запасами є визначення оптимального страхового запасу, що забезпечує баланс між витратами на зберігання та ризиками дефіциту [1, 2]. Традиційні підходи використовують фіксовані цільові рівні сервісу для визначення коефіцієнта безпеки при розрахунку страхового запасу, що не враховує динамічну природу попиту та економічну неоднорідність товарного асортименту. Класичні методи визначення страхового запасу базуються на припущенні стаціонарності параметрів системи та використанні єдиного рівня сервісу для всіх товарних позицій [3]. Емпіричні дослідження показують, що оптимальний рівень сервісу є функцією численних факторів: критичності товару, варіабельності попиту, надійності постачальників, вартості зберігання та втрат від дефіциту [1]. Статичний підхід призводить до неоптимального розподілу запасів, тобто надлишковості для некритичних позицій та недостатнього захисту для критичних товарів.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- розробити методологію інтеграції нечіткої логіки в класичну формулу страхового запасу;
- визначити ключові параметри системи нечіткого виведення для адаптивного управління;
- створити алгоритм автоматичного формування нечітких правил на основі історичних даних;
- забезпечити мінімізацію функції втрат між фактичними та прогнозними значеннями страхового запасу.

Основний зміст роботи. Під час роботи були використані наступні методи та інструменти:

- нечітка логіка (системи типу Мамдані);
- алгоритми машинного навчання (модифікований C4.5);
- методи оптимізації (градієнтний спуск);
- статистичний аналіз історичних даних.

Запропонована методологія базується на модифікації класичної формули страхового запасу шляхом заміни фіксованого коефіцієнта z на динамічно обчислюване значення z_{fuzzy}, яке визначається системою нечіткого виведення [4]. Базова формула страхового запасу з урахуванням повної дисперсії має вигляд:

$$SS = z_{fuzzy}(\mathrm{x}) \cdot \sqrt{LT \times \sigma_d^2 + \bar{d}^2 \times \sigma_{LT}^2} \tag{1}$$

де $z_{fuzzy}(x)$ є функцією нечіткого виведення, що залежить від вектора вхідних параметрів $x = [CV_d, TR, SC, LS, IC]^T$, які представляють коефіцієнт варіації попиту, оборотність товару, критичність для виробництва, надійність постачальника та відносну вартість зберігання відповідно.

Система нечіткого виведення реалізує відображення $\mathcal{F}: \mathbb{R}^5 \to [0.5,3.0]$, де вихідний діапазон відповідає коефіцієнтам z для рівнів сервісу від 69% до 99.9%. Процес нечіткого виведення включає три основні етапи: фазифікацію вхідних змінних через функції належності, застосування бази нечітких правил та дефазифікацію результату [5].

Для фазифікації кожної вхідної змінної використовуються трикутні та трапецієподібні функції належності, що визначають лінгвістичні терми [6]. Наприклад, для коефіцієнта варіації попиту, який обчислюється за формулою (2), визначаються терми «низький» (CV < 0.2), «середній» (0.15 < CV < 0.35) та «високий» (CV > 0.3) з відповідними функціями належності:

$$\mu_{low}(CV) = \begin{cases} 1, & CV \leq 0.15 \\ \dfrac{0.2 - CV}{0.05}, & 0.15 < CV < 0.2 \\ 0, & CV \geq 0.2 \end{cases} \tag{2}$$

Основною перевагою запропонованого підходу є автоматичне визначення нечітких правил на основі аналізу історичних даних замість використання експертних суджень [7, 8]. Для цього застосовується алгоритм навчання з учителем, що мінімізує функцію втрат між фактичними потребами в страховому запасі та прогнозними значеннями.

Нехай $\mathcal{D} = \{(\mathrm{x}_i, y_i)\}_{i=1}^{N}$ – навчальна вибірка, де x_i – вектор характеристик товару в момент часу t_i, а y_i – оптимальний рівень сервісу, визначений за

фактичними даними про дефіцити та надлишки. Оптимальний рівень сервісу для історичного періоду обчислюється як:

$$y_i = \arg\min_{\alpha \in [0.5, 0.999]} \left(C_{holding} \cdot SS(\alpha) + C_{stockout} \cdot P_{stockout}(\alpha) \right) \quad (3)$$

де $C_{holding}$ – витрати на зберігання одиниці страхового запасу, $C_{stockout}$ – втрати від дефіциту, $P_{stockout}(\alpha)$ – емпірична ймовірність дефіциту при рівні сервісу α.

Для автоматичного формування нечітких правил використовується модифікований алгоритм C4.5 для побудови дерева рішень з нечіткими листками [9, 10]. Кожен шлях від кореня до листка дерева інтерпретується як нечітке правило виду:

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_1 \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2 \text{ AND ... THEN } z_{fuzzy} = B \quad (4)$$

де A_i – лінгвістичні терми для вхідних змінних, B – консеквент правила.

Після побудови дерева рішень доцільно виконати оптимізацію параметрів функцій належності методом градієнтного спуску для мінімізації середньоквадратичної помилки прогнозування оптимального рівня сервісу [11]. Модуль нечіткого виведення реалізується на основі системи типу Мамдані з центроїдним методом дефазифікації [12].

Наукова новизна запропонованої методології полягає в розробці підходу до автоматичного формування бази нечітких правил для адаптивного управління запасами на основі машинного навчання. Це дозволить усунути необхідність залучення експертів та забезпечити об’єктивність налаштування системи.

Використання алгоритмів навчання з учителем для формування нечітких правил на основі історичних даних про оптимальні рівні сервісу дозволить автоматично визначати як структуру правил, так і параметри функцій належності. Застосування модифікованого алгоритму C4.5 з нечіткими листками забезпечить інтерпретованість правил, що критично важливо для практичного впровадження в системах підтримки прийняття рішень.

Висновки. В результаті було розроблено методологію адаптивного визначення рівня сервісу на основі нечіткої логіки, що представляє перспективний напрямок оптимізації систем управління запасами. Ключовою перевагою запропонованого підходу є можливість виявлення прихованих закономірностей у даних через комбінацію методів машинного навчання та нечіткої логіки. Інтерпретованість нечітких правил дозволяє менеджерам розуміти логіку прийняття рішень системою, що критично важливо для практичного впровадження. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка гібридних нейро-нечітких архітектур та розширення методології для багатоешелонних систем постачання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. León R., Miranda-Gonzalez P. A., Tapia-Ubeda F. J., Olivares-Benitez E. An Inventory Service-Level Optimization Problem for a Multi-Warehouse Supply Chain Network with Stochastic Demands. Mathematics. 2024. Vol. 12, No. 16. Article 2544. DOI: 10.3390/math12162544.
2. Gonçalves J. N. C., Sameiro Carvalho M., Cortez P. Operations research models and methods for safety stock determination: A review. Operations Research Perspectives. 2020. Vol. 7. Article 100164. DOI: 10.1016/j.orp.2020.100164.
3. Silver E. A., Pyke D. F., Thomas D. J. Inventory and Production Management in Supply Chains. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 792 p. DOI: 10.1201/9781315374406.
4. Yiğit F. A novel type-2 hexagonal fuzzy logic approach for predictive safety stock management for a distribution business. Scientific Reports. 2023. Vol. 13, No. 1. Article 19835. DOI: 10.1038/s41598-023-46649-0.
5. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
6. Khairuddin S., Hasan M. H., Hashmani M. A., Azam M. H. Generating Clustering-Based Interval Fuzzy Type-2 Triangular and Trapezoidal Membership Functions: A Structured Literature Review. Symmetry. 2021. Vol. 13, No. 2. Article 239. DOI: 10.3390/sym13020239.
7. Guillaume S. Designing fuzzy inference systems from data. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2001. Vol. 9, No. 3. P. 426–443. DOI: 10.1109/91.928739.
8. Casillas J., Cordón O., Herrera F., Magdalena L. Interpretability Issues in Fuzzy Modeling. Berlin : Springer, 2003. 556 p. DOI: 10.1007/978-3-540-37057-4.
9. Janikow C. Z. Fuzzy decision trees: issues and methods. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 1998. Vol. 28, No. 1. P. 1–14. DOI: 10.1109/3477.658573.

УДК 004.4:004.738.5:659.3

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], В.С. Хілов[2], С.В.Федорцова[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна
[2]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

АДАПТИВНІСТЬ І КРОСПЛАТФОРМНІСТЬ ЯК ОСНОВА СУЧАСНИХ WEB-ПРОЄКТІВ

Анотація. У статті розглянуто характеристики та принципи адаптивності і кросплатформності web-проєктів, які компоненти у розробці грають головну роль для їхнього досягнення, пояснено їхні переваги та труднощі, продемонстровано різноманітні платформи і сервіси, що допомагають вирішити ці проблеми.

Ключові слова: *fluid grid, користувацький досвід (UX), Bootstrap, фреймворк, оптимізація, читабельність.*

Вступ. Вебпростір став невід’ємною частиною життя сучасної людини. Вебтехнології використовуються для навчання, бізнесу, відпочинку та спілкування. Це створює багато вимог для розробників, адже сайти мають бути зручними для використання, швидкими в роботі і зрозумілими, незалежно від програми на якій працює користувач.

Через це адаптивність та кросплатформність стали одними з найважливіших критеріїв веброзробки. Адже кожен відвідувач сайту очікує зручного відображення сторінки та її стабільної роботи, незалежно від пристрою або браузеру. Виконання цієї потреби є невід'ємною складовою позитивного користувацького досвіду (UX). Сьогодні поняття «зручність користувача» охоплює не лише зовнішній вигляд сторінки, а й швидкість завантаження, інтуїтивність навігації, доступність для людей із обмеженими можливостями (наприклад, через технології screen reader), а також стабільну поведінку інтерфейсу в будь-яких умова

Основний зміст роботи. Головним показником *адаптивності* є автоматичне підлаштовування під розмір і характеристики екрану, на якому відбувається перегляд. А головною метою є зручність сайту, для будь якого формату використання, не змінюючи кардинально зміст та логіку його побудови.

Завдяки адаптивності вебсторінка зберігає свою читабельність, зрозумілість та функціональність як на великому екрані комп'ютера так і на маленькому смартфоні, адже можливість зручно використовувати сайт на будь якому приладі автоматично зробить його більш приємним для користувача.

Для досягнення адаптивності, веброзробники використовують такі головні принципи:

1. Гнучка сітка (fluid grid), яка будує сторінку на основі відносних одиниць вимірювання, що допомагає елементам змінювати розмір разом з шириною екрану.

2. Медіа запити (media queries) - правила CSS, що дають можливість створювати різні стилі для різних розмірів екрану або направленості пристрою.

3. Гнучкі зображення (responsive images) — використання атрибутів srcset та sizes, що дозволяють браузеру вибирати найоптимальніше зображення для поточного пристрою.

4. Адаптивна типографіка, коли шрифти масштабуються відповідно до розміру вікна перегляду, забезпечуючи легке читання без необхідності збільшувати сторінку вручну.

Також варто зазначити, що висока адаптивність сайту напряму впливає на більшу тривалість перебування на ньому і взаємодію з контентом відвідувача. Окрім цього, пошукові системи, наприклад Google, надають перевагу адаптивним сайтам, що покращує SEO-позиції ресурсу, тобто підвищення позицій сайту в результатах видачі пошукових систем за певними запитами.

Кросплатформність допомагає вебдодатку коректно працювати на різних операційних системах та пристроях, незалежно від технічних обмежень. У контексті веброзробки кросплатформність означає сумісність сайту з різними браузерами (Google Chrome, Mozilla Firefox, Microsoft Edge, Safari, Opera тощо) та операційними системами (Windows, macOS, Android, iOS, Linux).

Висока кросплатформність досягається завдяки відкритим стандартам веброзробки, що включають в себе технології HTML, CSS та JavaScript. Також є універсальні фреймворки та бібліотеки (Bootstrap, Tailwind CSS, React, Vue.js),

що дозволяють створювати одинаковий інтерфейс на різних пристроях. Існує ще й підхід mobile-first, коли початкова мобільна версія розширюється для більших екранів, адже багато додатків зараз починаються саме так.

Важливо зазначити й те, що кросплатформність в першу чергу підвищує продуктивність розробника, адже йому не потрібно створювати окремі версії під кожну операційну систему. А користувачу це забезпечує єдиний і стабільний досвід роботи з вебресурсом.

Адаптивність і кросплатформність хоч і мають різні значення, але безсумнівно взаємопов'язані і впливають один на одного. Якщо адаптивність дає гнучкість і зручність зображення, то кросплатформність забезпечує стабільну роботу сайту на різних ОС і пристроях. Безсумнівно, це надає багато переваг:

1. Зменшення витрат на підтримку. Один універсальний код легше оновлювати та тестувати, ніж кілька окремих версій.
2. Підвищення швидкодії. Завдяки оптимізації зображень і коду адаптивний сайт швидше завантажується, навіть за слабкого інтернет-з'єднання.
3. Покращення доступності. Адаптивний дизайн робить сайт зручним не лише на різних пристроях, а й для людей із вадами зору або моторики.
4. Підвищення конкурентоспроможності. Користувачі частіше залишаються на сайтах, які зручно переглядати з будь-якого пристрою, що напряму впливає на прибутковість компаній.
5. SEO-переваги. Пошукові системи, зокрема Google, надають перевагу сайтам, що є одночасно адаптивними, швидкими й безпечними.

Попри розвиток технологій, веброзробники все ж стикаються з низкою труднощів у забезпеченні цих критеріїв. Головна проблема – різна поведінка елементів у браузерах. Один і той самий код може виглядати по-різному у Chrome, Safari чи Firefox. Для цього використовують кросбраузерні фреймворки (Bootstrap (рис.1), Tailwind) і автопрефіксери.

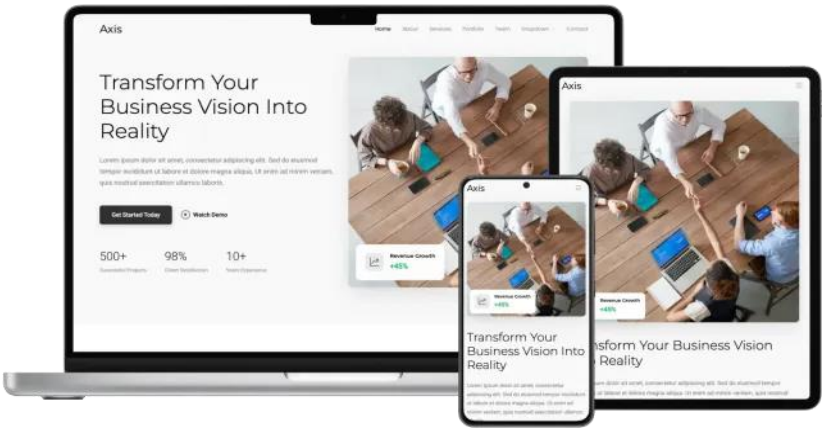


Рис. 1. Вебсторінка, створена з допомогою Bootstrap, на різних пристроях

Ще однією складністю є велика кількість пристроїв із різними розмірами екранів. Уникнути помилок допомагає гнучка сітка (Flexbox, Grid) і підхід *mobile-first*, коли спочатку створюють мобільну версію сайту. Іноді виникають

труднощі з відображенням мультимедіа й інтерфейсу – відео або кнопки не масштабуються. Тут допомагають відносні одиниці виміру, адаптивна типографіка та використання viewport meta-тегів, які задають масштабування сторінки на мобільних пристроях.

Висновки. Адаптивність і кросплатформність є не просто технічними вимогами, а стратегічними принципами сучасної веброзробки. Вони визначають якість взаємодії користувача з сайтом, впливають на його доступність, швидкодію та успішність у конкурентному середовищі.

Окрім технічного аспекту, важливо враховувати й естетичну складову – дизайн має бути гармонійним, мінімалістичним і логічно структурованим. Зручність користувача напряму залежить від того, наскільки швидко він знайде потрібну інформацію або виконає бажану дію. Сучасний вебсайт повинен бути гнучким, універсальним і стабільним на всіх пристроях та платформах. Для цього розробникам необхідно поєднувати технічні знання з розумінням потреб користувача, застосовувати сучасні фреймворки, адаптивні сітки та методи оптимізації. Отже, адаптивність і кросплатформність – це запорука розвитку вебтехнологій, що дозволяє створювати зручні, надійні й ефективні ресурси, здатні залишатися актуальними в умовах швидких технологічних змін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Marcotte E. Responsive Web Design: A book apart n 4. – Editions Eyrolles, 2017.
2. Freeman A. HTML and Bootstrap CSS Primer //Pro AngularJS. – Berkeley, CA : Apress, 2014. – С. 55-74.
3. Mozilla Developer Network (MDN). Cross-Browser Compatibility and Testing. [Електронний ресурс] – URL: https://developer.mozilla.org/ (дата звернення: 24.10.2025).
4. W3C. Media Queries Level 4. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.w3.org/TR/mediaqueries-4/ (дата звернення: 24.10.2025).
6. About BrowserStack [Електронний ресурс] – URL: https://www.softwareadvice.com.au /software/200650/browserstack (дата звернення: 31.10.2025).

УДК 004.9

Д.В. Іванов[1], Т.Р. Куршубадзе[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІНТЕГРАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ПОЄДНАННЯ SQL ТА NoSQL БАЗ ДАНИХ У ГІБРИДНИХ АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Представлено науково обґрунтований підхід до інтеграції реляційних (SQL) та нереляційних (NoSQL) баз даних у межах гібридних аналітичних систем. Запропонована модель базується на принципах polyglot persistence та передбачає створення уніфікованої архітектури для забезпечення балансу між продуктивністю, узгодженістю та масштабованістю. Підхід орієнтовано на використання у системах великих даних (Big Data), штучного інтелекту (AI) та Інтернету речей (IoT). Визначено практичні напрями впровадження у сфері бізнес-аналітики, промислового моніторингу та інтелектуальних аналітичних платформ.

***Ключові слова**: SQL, NoSQL, гібридні системи, інтеграція баз даних, polyglot persistence, Big Data, AI, IoT.*

Вступ. Сучасні інформаційні системи функціонують у середовищі, де обсяг, різноманітність і швидкість надходження даних зростають у геометричній прогресії. Традиційні реляційні бази даних (SQL) забезпечують високий рівень узгодженості та підтримку складних транзакцій, проте мають обмеження при роботі з неструктурованими даними й масштабуванням.

Натомість нереляційні бази даних (NoSQL) орієнтовані на високу продуктивність, гнучкість і горизонтальне масштабування, що робить їх ефективними для великих обсягів інформації, але вони поступаються SQL у гарантіях консистентності.

Таким чином, постає потреба у створенні гібридних інформаційних систем, які поєднують сильні сторони обох підходів – надійність і транзакційність SQL із масштабованістю та швидкодією NoSQL.

Постановка задачі. Метою роботи є розроблення інтеграційного підходу до поєднання SQL та NoSQL баз даних у межах гібридних систем, що забезпечить ефективне управління даними з різною структурою та властивостями.

Для досягнення мети визначено такі завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до інтеграції реляційних і нереляційних баз даних;
- розробити архітектурну модель інтеграційного шару для гібридних систем;
- сформувати математичну модель оцінки узгодженості та продуктивності інтегрованої системи;
- визначити практичні напрями використання розробленого підходу у сучасних аналітичних IT-рішеннях.

Основний зміст роботи. Запропонований інтеграційний підхід ґрунтується на принципах polyglot persistence, що передбачає поєднання кількох технологій зберігання даних у межах єдиного інформаційного середовища. Це дозволяє ефективно використовувати сильні сторони різних типів баз даних: транзакційну надійність реляційних сховищ і високу швидкодію нереляційних систем при роботі з великими обсягами неструктурованої інформації.

Основна ідея полягає у створенні інтеграційного шару, який забезпечує прозоре взаємодіяння між SQL та NoSQL компонентами без необхідності зміни логіки прикладних програм. Такий шар виконує роль посередника, що приймає запити, визначає їхній тип та спрямовує до відповідного сховища. При цьому забезпечується дотримання узгодженості даних за рахунок механізмів синхронізації та транзакційного контролю.

Однією з ключових переваг запропонованої моделі є адаптивність архітектури, яка дозволяє масштабувати окремі компоненти залежно від навантаження. У SQL-середовищі це досягається шляхом оптимізації індексів і розподілу запитів між вузлами, тоді як у NoSQL-сховищах – за рахунок горизонтального шардінгу й асинхронної реплікації. Об’єднання цих механізмів забезпечує стабільну роботу системи навіть за умов нерівномірного потоку запитів.

Інтеграційний рівень системи включає:

- уніфікований інтерфейс запитів, який забезпечує виконання запитів незалежно від типу сховища;
- механізм синхронізації, що підтримує узгодженість даних між SQL та NoSQL компонентами;
- аналітичний модуль, який застосовує алгоритми машинного навчання (ML) для прогнозування навантаження й оптимізації запитів.

Суттєвою складовою інтеграційної моделі є уніфікований інтерфейс доступу до даних, який дає змогу користувачам формувати запити у стандартній формі незалежно від того, у якому типі бази даних вони зберігаються. Це досягається за допомогою проміжного модуля трансляції запитів, який перетворює команди SQL у відповідні структури запитів NoSQL (наприклад, JSON-документи або ключ-значення).

У межах аналітичного рівня реалізовано механізми попередньої обробки, агрегації та оптимізації запитів, які дозволяють зменшити час відповіді системи. Розроблена модель враховує характеристики навантаження, типи даних і частоту оновлення, що робить її придатною для динамічних середовищ, де обсяг інформації змінюється у реальному часі.

Важливою частиною роботи є модель оцінки ефективності інтеграції, що базується на трьох ключових метриках: продуктивність, час обробки запиту та коефіцієнт узгодженості. Визначення оптимального співвідношення цих показників дає змогу обґрунтовано вибирати архітектурні параметри системи. Результати моделювання підтвердили, що збалансоване використання SQL та

NoSQL сховищ дозволяє знизити середній час відповіді на 20–25% і водночас підтримувати високий рівень узгодженості (до 0.98).

Окрім технічних аспектів, запропонований підхід має важливе методологічне значення, оскільки формує універсальну основу для розроблення гібридних систем незалежно від конкретних технологій чи платформ. Його можна застосовувати у будь-яких інформаційних середовищах, де необхідно забезпечити ефективну взаємодію між різнорідними джерелами даних.

Особливу увагу приділено проблемі забезпечення узгодженості між реляційними та нереляційними компонентами. Вирішення цієї проблеми передбачає використання принципів eventual consistency, за яких система гарантує повну синхронізацію даних через певний проміжок часу, не жертвуючи при цьому продуктивністю. Для критично важливих транзакцій може застосовуватись режим жорсткої узгодженості з миттєвим підтвердженням змін у SQL-сховищі.

Архітектура гібридної системи складається з чотирьох рівнів (рис. 1):

1. Рівень зберігання даних – включає SQL (MySQL, PostgreSQL) і NoSQL (MongoDB, Cassandra) бази.
2. Інтеграційний рівень – містить модуль маршрутизації запитів, систему контролю узгодженості та балансування навантаження.;
3. Аналітичний рівень – відповідає за обробку великих обсягів даних, побудову звітів, аналітичних панелей і підтримку AI-моделей.
4. Прикладний рівень – інтерфейс користувача або бізнес-додатки, які взаємодіють з даними через API.

Для кількісної оцінки ефективності інтеграції застосовано такі показники:

- продуктивність (P) – кількість оброблених запитів за секунду;
- час обробки (T) – середній час відповіді на запит;
- коефіцієнт узгодженості (K) – співвідношення синхронізованих даних до загальної кількості записів, що можна вирахувати за формулою (1):

$$K = \frac{D_{sync}}{D_{total}} \quad (1)$$

Результати моделювання показали, що при використанні інтеграційного підходу час відповіді знижується на 20–25%, а коефіцієнт узгодженості даних сягає 0.96–0.98.

Практичні експерименти показали, що гібридна система здатна масштабуватись у реальному часі, підтримуючи понад 1000 паралельних транзакцій за секунду.

Приклади практичного застосування:

- бізнес-аналітика: об’єднання структурованих фінансових даних (SQL) з потоками неструктурованої інформації з маркетингових платформ (NoSQL) для побудови динамічних звітів;

- інтернет речей (IoT): інтеграція даних із сенсорів і промислових пристроїв у реальному часі для моніторингу стану виробничих процесів;
- штучний інтелект (AI): побудова моделей машинного навчання на основі даних із різних джерел, що зберігаються в гібридному середовищі;
- кібербезпека: створення систем аналізу подій безпеки, де транзакційна надійність SQL поєднується зі швидким збереженням логів у NoSQL.

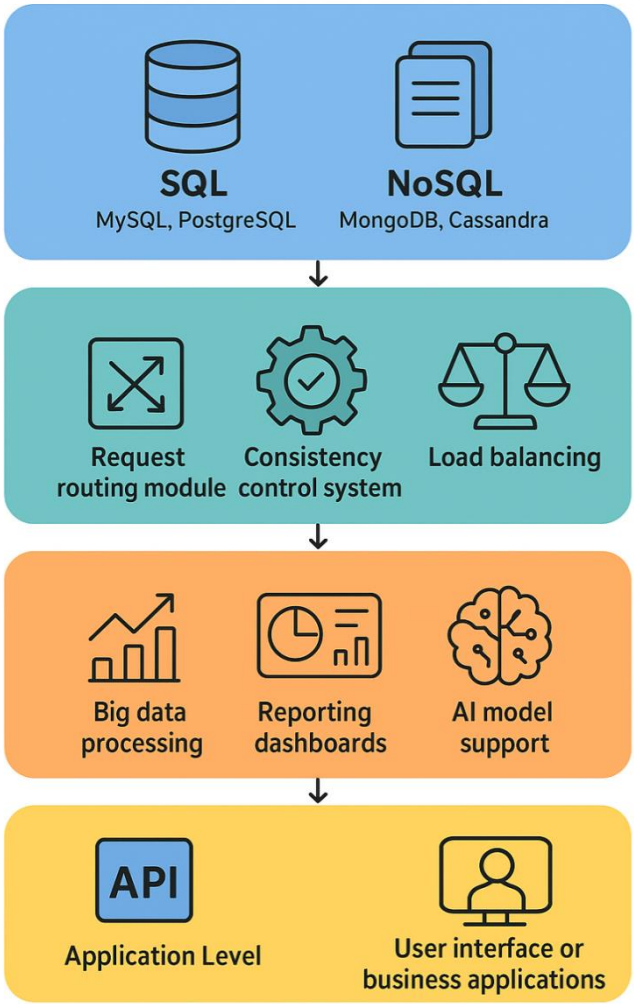


Рис. 1. Архітектура гібридної системи

Розроблений інтеграційний підхід також сприяє підвищенню надійності системи за рахунок дублювання окремих компонентів і можливості відновлення після збоїв без втрати даних. Це особливо актуально для корпоративних аналітичних платформ, де безперервність роботи є критичною.

Додатковою перевагою є зменшення складності адміністрування, оскільки інтеграційний рівень бере на себе функції маршрутизації запитів, балансування навантаження та моніторингу стану системи. Завдяки цьому розробники можуть зосередитись на логіці аналітичних процесів, не витрачаючи ресурси на ручну координацію різних баз даних.

Таким чином, розроблена модель інтеграції SQL та NoSQL баз даних забезпечує єдиний простір даних, у якому можлива обробка як структурованої, так і неструктурованої інформації з високою швидкістю, збереженням консистентності та підтримкою масштабованості. Це відкриває перспективи для створення інтелектуальних аналітичних систем нового покоління, здатних працювати з гігантськими масивами даних у реальному часі.

Наукова новизна полягає у розробленні узагальненої математичної моделі інтеграції SQL та NoSQL баз даних із урахуванням динамічних навантажень і структурних відмінностей між типами сховищ.

Основні наукові результати:

- удосконалено підхід до розподілу запитів за типом даних, що дозволяє зменшити середній час відповіді без втрати узгодженості;
- запропоновано універсальний інтеграційний модуль з адаптивним механізмом балансування навантаження між SQL та NoSQL компонентами;
- вперше формалізовано алгоритм динамічного перемикання між різними сховищами даних залежно від типу запиту та рівня його критичності;
- розроблено рекомендації щодо застосування підходу у промислових аналітичних платформах, де необхідно забезпечити високу надійність і масштабованість;
- визначено, що поєднання технологій SQL і NoSQL сприяє розвитку адаптивних аналітичних систем із підтримкою AI та прогнозної аналітики.

Висновки. Розроблений інтеграційний підхід до поєднання SQL і NoSQL баз даних забезпечує ефективне функціонування гібридних аналітичних систем у середовищах великих даних. Він дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити узгодженість і гнучкість масштабування, а також спростити управління гетерогенними даними. Запропонована модель може бути використана для створення сучасних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, платформ штучного інтелекту, систем промислового моніторингу та цифрової трансформації бізнесу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

14. Khan W., et al. SQL and NoSQL Database Software Architecture: A Systematic Review // Knowledge. – 2023. – Vol. 7, No. 2. – P. 97.
15. Zajac M., Störl U. Hybrid Data Management Architecture for Present Quantum Computing // arXiv (vision paper). – 2024.
16. Tripathi N., Kumar A. NoSQL database education: A review of models, tools and techniques // Journal of Systems and Software. – 2025. – Vol. 185, 111235.
17. Ragunathan A. Integration of NoSQL and Relational Databases for Efficient Data Management in Hybrid Cloud Architectures // Journal of Machine and Computing. – 2025. – 5(2), 1277–1286.
18. Bjeladinović S., Marjanović Z., Babarogić S. Extending hybrid SQL/NoSQL database: process model and architecture // (розширення архітектури гібридних БД). – 2025.
19. Van Landuyt D., et al. A Comparative Performance Evaluation of Multi-Model NoSQL Databases and Polyglot Persistence // ACM (conference/journal). – 2023.
20. Islam A. Hybrid Cloud Databases for Big Data Analytics: A Review // SSRN. – 2024.

21. Goze I. M., Erginer G., Dilber C., Pozut B., Ozpinar A. Hybrid Data Management Architecture with Microservices Integrating SQL and NoSQL Databases for Asset Management Companies // Oracle Journal of Research. – 2024. – 12(1), 45–58.
22. Khan A., et al. Hybrid big data optimization based energy-efficient and AI-driven architecture // (ScienceDirect / Elsevier). – 2025.
23. PingCAP (tech article). SQL vs NoSQL: Bridging the Gap with Hybrid Databases // PingCAP Articles. – 2024.
24. Systematic literature review: Performance Evaluation and Interoperability of SQL/NoSQL designs // (JCBBI / інші журн.). – 2024.

УДК 004.8:004.93:004.94

І.М. Гаркуша[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИКОРИСТАННЯ CNN ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАСОК НЕПРОЗОРИХ ХМАР ЗА ДАНИМИ RGB-КАНАЛІВ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМОЗНІМКІВ

Анотація. Описаний процес підготовки датасету для рішення задачі створення маски непрозорих хмар за допомогою згорткової нейронної мережі. Наведені результати обробки тестового RGB-зображення, яке є фрагментом мультиспектрального космознімку, що отриманий з апарату дистанційного зондування Землі з космосу серії Sentinel-2.

Ключові слова: *згорткова нейронна мережа, мультиспектральне зображення, маска хмар, Sentinel-2, CNN, Python.*

Вступ. Дані дистанційного зондування (ДЗ) Землі з космосу надають дослідникам, аналітикам та іншим користувачам широкі можливості по залученню просторової інформації про об’єкти місцевості та різні процеси, які відбуваються на територіях, охоплених зйомкою. Велике значення мають дані зйомки високої роздільної здатності мультиспектральних сканерів серій супутників ДЗ Landsat та Sentinel-2. Найчастіше подібні дані використовують для задач оцінки стану та прогнозування вражаю сільськогосподарських культур, моніторингу стану водних, промислових ресурсів та екосистем, оцінки наслідків стихійних лих, моніторингу ландшафтів регіонів. Оскільки отримання таких даних відбувається в оптичних діапазонах електромагнітного спектру, то відповідно великою проблемою при їх обробці стає вплив стану атмосфери – вплив хмар, вологості, різних атмосферних забруднювачів. Актуальним є питання використання інформаційних технологій, що дозволяють при обробці подібних даних ДЗ маскувати ділянки зображень, які, наприклад, покриті хмарами.

Існує певна множина обчислювальних методів та технологій, що дозволяють в той чи інший мірі якісно створювати маски хмар. Велике значення

в цьому процесі має певна множина каналів зйомки мультиспектрального сканера та їх спектральні характеристики. З подібним оглядом можна ознайомитися, наприклад, в роботах [1, 2]. Так в роботі [2] розглядалася побудова повнозв'язної штучної нейронної мережі (ШНМ) з архітектурою нейронів в шарах з кількістю 3-360-260-30-2. Така ШНМ показала високу якість створення масок непрозорих хмар при використанні каналів B01, B05 та B10 мультиспектрального сканера MSI [3] платформи зйомки Sentinel-2.

Ціллю дослідження було адаптування наявної архітектури згорткової нейронної мережі (Convolution Neural Network, CNN), яка б дозволила допомогти створювати маски непрозорих хмар з використанням виключно каналів RGB. Тобто у випадку космознімків Sentinel-2 це відповідно канали B04, B03, B02 мультиспектрального сканера MSI.

Варіант RGB-каналів є важливим, оскільки:

– у мультиспектральних сканерах для задач ДЗ можуть бути відсутні канали, на кшталт каналів сканера MSI B01 та B10 (відповідно для допомоги із фіксацією аерозолів та для виявлення перистих хмар);

– у складі продуктів зйомок для кінцевих користувачів можлива відсутність готових масок хмар або наявні маски мають низьку якість.

Треба зауважити, що як було встановлено при дослідженні архівних продуктів зйомок Sentinel-2, маски хмар у їх складі часто зустрічаються з незадовільною якістю і це було показано у роботі [2].

Канали мультиспектральних сканерів для зйомок у видимому діапазоні електромагнітного спектру (RGB-канали), як правило, присутні у більшості відомих мультиспектральних сканерів. Тому подібна робота є актуальною.

Постановка задачі. В процесі дослідження для досягнення цілі виконані задачі:

– обраний мультиспектральний космознімок із фіксацією певної хмарності території зйомки, отриманий з одного із супутників серії Sentinel-2;

– розроблений алгоритм створення навчального набору із растрових RGB-фрагментів певних розмірів на базі мультиспектрального космознімку;

– відібрано та адаптовано архітектуру CNN для рішення задачі класифікації на базі растрового навчального набору з RGB-зображень;

– мовою Python розроблені скрипти для створення навчального набору, проведення навчання, тестування та оцінки якості класифікації на базі адаптованої архітектури CNN, а також програма класифікації RGB-зображення з наявними хмарами із використанням створеної моделі класифікатора на базі CNN.

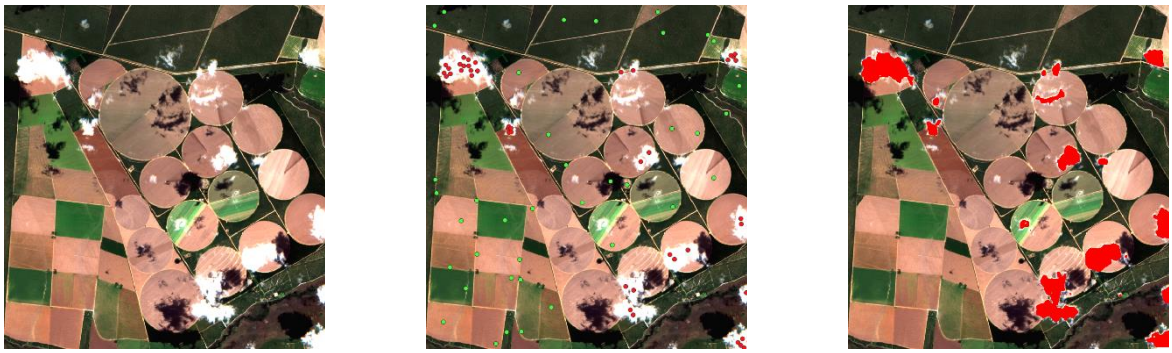
Основний зміст роботи. CNN застосовують для розпізнавання об'єктів на зображеннях. Тому типовим було використання CNN для задачі розпізнавання непрозорих хмар.

В якості вхідних даних обраний RGB-фрагмент мультиспектрального космознімку з апарату ДЗ серії Sentinel-2 (дата зйомки 04.04.2020) території

сільськогосподарських полів, на якому є непрозорі та напівпрозорі хмари (рис. 1, а).

Для підготовки навчального датасету були проставлені точки по всій площі зображення: 50 точок на непрозорих хмарах та 50 – на об’єктах місцевості, які не є хмарами (рис. 1, б).

За допомогою розробленого скрипту мовою Python створені зразки для навчання CNN – RGB-зображення розміром 11x11 піксель. Кожна проставлена точка виступала центром певного зразка. Створений датасет для навчання CNN містив 4D-тензор із матрицею ознак *X* (розмір: 98, 11, 11, 3) та тензор першого рангу із цільовим вектором *y* (розмір 98). Кількість зразків дорівнювала 98, оскільки дві точки були проставлені біля межі зображення та неможливо було автоматизовано зробити від цих точок зразок 11x11 піксель. Набір даних розділений на навчальний (78 зразків) та тестувальний (20 зразків).



а) б) в)

Рис. 1. Фрагмент мультиспектрального композитного кольорового зображення (а), нанесені точки – центри зразків для навчання CNN (б) – червоні позначають клас Cloud, зелені – NoCloud та результат роботи класифікатора на базі CNN із растровою маскою хмар (в), що позначена червоним кольором

За основу архітектури CNN прийнята така, що використана для розпізнавання рукописних цифр з навчального набору даних MNIST [4] та подана у розділі прикладів відомої бібліотеки Keras [5].

Входи адаптованої для рішення поточної задачі CNN налаштовані на приймання зразків тензора (11, 11, 3). Перший згортковий шар містить 32 фільтри з розміром ядер 3x3 та функцією активації ReLU із подальшим пулінгом за максимальним значенням з розміром вікна 2x2. Наступним йде згортковий шар із 64 фільтрів з розміром ядер 3x3 та функцією активації ReLU із подальшим пулінгом. Далі йдуть типові кроки Flatten та Dropout. Завершується CNN шаром з двома нейронами та функцією активації SoftMax. В якості функції втрат використана функція категорійної крос-ентропії, а в якості оптимізатора обраний оптимізатор Адама. Кількість епох на початковому експерименті була встановлена 15, але як показали метрики точності та втрат, мережа була вже навчана протягом п’яти епох при кількості пакетів 3. На тестувальному піднаборі

даних досягнута точність 100% – 13 зразків віднесені до класу Cloud, а 7 зразків до класу NoCloud безпомилково.

Збережена модель CNN в подальшому використана для класифікації представленого на рис. 1 RGB-зображення. Результат класифікації (створена маска непрозорих хмар) представлений на рис. 1, в.

Висновки. В процесі дослідження мовою Python розроблені скрипти автоматизованої обробки мультиспектральних космознімків Sentinel-2 та адаптована відома архітектура CNN для вирішення задачі виділення непрозорих хмар за RGB-зображеннями. В подальших дослідженнях планується адаптування розробленого прототипу як універсального інструменту для виділення хмар на різночасових мультиспектральних космознімках Sentinel-2, Landsat та ін. З цією метою пропонується розширювати навчальні датасети з пікселями хмар для різних систем зйомок та територій досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cloud Mask Intercomparison eXercise (CMIX): An evaluation of cloud masking algorithms for Landsat 8 and Sentinel-2 / Sergii Skakun and etc. Remote Sensing of Environment 274 (2022) 11299. URL: https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112990 (дата звернення: 14.05.2025).
2. Гаркуша І.М., Балалаєва О.Ю., Іванов Д.В., Журавльова Ю.С. Аспекти створення масок непрозорих хмар для мультиспектральної зйомки Sentinel-2 із залученням крос-платформної бібліотеки GDAL та технологій штучного інтелекту // Електротехнічні та інформаційні системи, № 107, 2025. С. 72 – 81. URL: https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-10 (дата звернення: 20.08.2025).
3. Sentinel-2 Products Specification Document. REF : S2-PDGS-CS-DI-PSD, Issue : 15.0. ESA, Sopra Steria, CS team, 2024. 487 p.
4. ThensorFlow. The MNIST database of handwritten digits. URL: https://www.tensorflow.org/datasets/catalog/mnist (дата звернення: 15.10.2025).
5. Keras. Examples. Simple MNIST convnet. URL: https://keras.io/examples/vision/mnist_convnet/ (дата звернення: 15.10.2025).

УДК 658.562:620.179.16:620.179.17

О.І. Курандо[1], Ю.О. Плєснецов[1], С.Ю. Плєснецов[1]
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИМОГИ ДО ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Анотація. Технологічність гнутих профілів визначається як поєднання конструктивних елементів, що забезпечує найпростіше та найекономічніше їх виготовлення при високих експлуатаційних властивостях. Розглянуто загальні вимоги технологічності (механічні властивості, допуски, тип профілю), фактори вибору оптимальної технології виготовлення (масовість, економічні витрати), а також методи неруйнівного контролю продукції профілювання.

Ключові слова: *технологічність, гнуті профілі, вимоги технологічності, неруйнівний контроль, режим формоутворення, виготовлення профілів, конструкція профілю.*

Вступ. Під технологічністю деталі розуміють таке поєднання основних елементів її конструкції, яке найпростіше забезпечує її виготовлення та високу якість експлуатації. Забезпечення технологічності є невід'ємною частиною формування як технології виготовлення, так і технології контролю гнутих профілів.

Опрацювання профілю на технологічність. При проектуванні конструкцій з використанням економічних гнутих профілів конструктор прагне обирати раціональні форми цих профілів з точки зору функціональності конструкції, технологічності при монтажі. Також конструктор повинен забезпечити найкращі експлуатаційні якості та передбачити найпростіше, економічне їх виготовлення.

Для створення технології виготовлення гнутого профілю важливими є вихідні дані (форма профілю, параметри поперечного перетину, матеріал, вимоги до якості профілю), представлені в структурованому вигляді на рис. 1.

До загальних вимог технологічності виробництва гнутих профілів відносяться наступні:

1) механічні властивості листового матеріалу повинні мати тимчасовий опір розриву до 390 МПа, відносне подовження має бути не менше 6%;

2) зниження металомісткості конструкції деталі за рахунок застосування ребер жорсткості, відбортувань тощо;

3) зменшення кількості товщин листового матеріалу (переважний ряд товщин: 0,6; 0,8; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5 мм);

4) конструкція профілю відкритого типу є кращою, ніж конструкція профілю закритого та напівзакритого типів (з точки зору виготовлення);

5) допуски на розміри поперечного перетину деталей, що профілюються, повинні відповідати точності процесу профілювання (9-14-й квалітет);

6) допуск на довжину деталі недоцільно призначати меншим за 2 мм;

7) мінімально допустимі внутрішні радіуси згинання для пластичних низьковуглецевих сталей становлять, як правило, 0,5S, і призначати їх слід лише за конструктивної необхідності;

8) мінімально допустима висота відбортувань становить, як правило, 2s (призначати мінімальні значення слід лише за конструктивної необхідності. зазвичай висота відбортувань призначається не меншою 4 товщин);

9) міцність покриття повинна допускати згинання заготовки на заданий відносний радіус згинання (не менше одиниці);

10) за наявності перфорації у заготовках повинні виконуватись спеціальні умови згідно з інструкцією.

Рис. 1. Вихідні данні профілю для аналізу технологічності

При конструюванні деталі не слід необґрунтовано призначати допуски підвищеної точності, оскільки це здорожує вартість виготовлення інструменту.

Конструкція деталі та вимоги до реалізації процесу її виробництва визначають технологію та обладнання, що застосовується. Саме тому гнуті профілі підлягають аналізу щодо їх технологічності. При виборі оптимального варіанта виготовлення гнутих профілів слід виходити з урахування наступних факторів [9]:

1) масовість виробництва;

2) можливість реалізації на профілезгинальному обладнанні;

3) швидкість профілювання (6-20 м/хв);

4) мінімальні економічні витрати на виготовлення деталі: простота технологічного процесу);

5) можливість використання некваліфікованого персоналу;
6) мінімальні витрати матеріальних засобів;
7) мінімальні витрати часу на виготовлення інструменту;
8) безпечна робота людини при виготовленні продукції;
9) застосування безпечного обладнання.

Зазвичай при виборі способу виготовлення більше звертають увагу на четвертий та п'ятий пункти, що дозволяє мінімізувати економічні витрати. Не менш важливим є також перший фактор. Так, при масовому та багатосерійному виробництві можливе застосування дорогого, але швидкодіючого обладнання, оскільки економічні витрати на одну деталь швидко окупаються. При дрібносерійному виробництві застосування такого обладнання є нераціональним, оскільки застосовують більш дешевше та менш швидкодіюче обладнання [9].

Вибір схеми та режимів формоутворення

Режим формоутворення має вирішальне значення для забезпечення необхідної якості профілю за мінімальних витрат. Він характеризується кутами підгинання профілю за прохід і радіусами кривизни місць вигину заготовки. Режим формоутворення призначається з урахуванням параметрів напружено-деформованого стану та механічних властивостей металу, розмірів заготовки та елементів профілю, системи калібрування валків та технологічного процесу профілювання [4, 10].

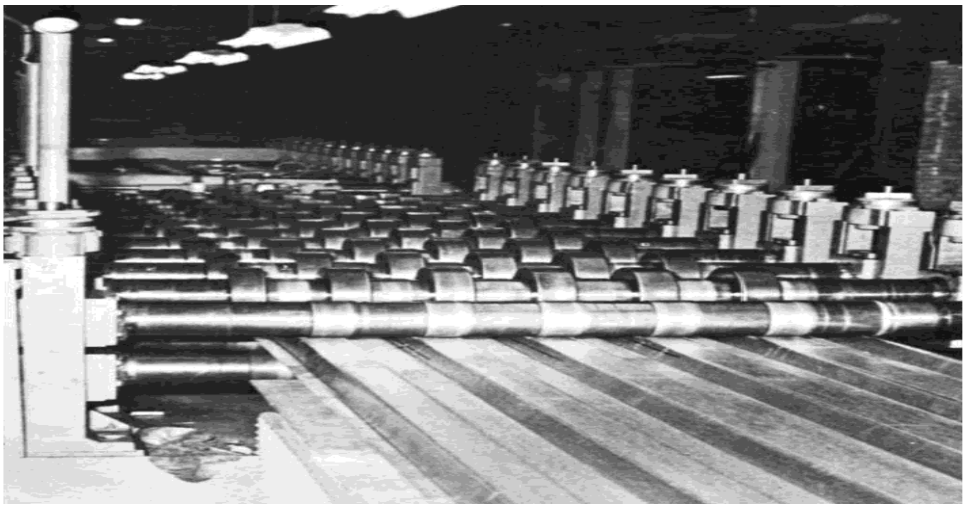


Рис. 2. Схема формоутворення гофрованого профілю

Методи та заходи неруйнівного контролю продукції профілювання. На сучасному виробництві заходи неруйнівного контролю зазвичай інтегруються до лінії профілювання. Виготовлення металопродукції супроводжується створененям інформаційно-вимірювальної системи або комплексу, що виконує свої функції на проміжкових та фінальних етапах формоутворення, забезпечуючи контроль геометричних (товщина, кути підгинання тощо) та механічних (твердість, пластичність тощо) [11].

До використовуваних методів неруйнівного контролю відносяться:

1. Акустичний (ультразвуковий). Луна-метод, часовий метод для контролю товщини.

2. Електромагнітно-акустичний метод. Використовується для тих же задач, що і стнандартний ультразвуковий метод, а аткож для контролю поверхні з використанням збудження поздовжньої хвилі.

3. Вихорострумовий метод. Для виявлення девектів поверхні та порушень цілістності.

4. Рентгенівський метод. Для виявлення комплексних дефетів, мікротріщин, тощо, які не виявляються іншими методами.

5. Контроль проникаючими речовинами (капілярний метод).

Наукова новизна розробки складається в узагальненні підходів до створення технологічних процесів профілювання та розвитку методів оцінок для вибору оптимальних технологічних систем.

Висновки. В результаті виконання розробки створено ефективний алгоритм для обрання найбільш важливих рішень щодо використання методів створення процесів профілювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Wang F.L. Numerical studies of collapse be haviour of multi-span beams with cold formed sigma sections / F.L. Wang, J. Yang, J. Lim // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 345–358.
2. Wang L. Cold-formed steel channel sections with web stiffeners subjected to local and distortional buckling – Part I: tests and finite element analysis / L. Wang, B. Young // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. - 2014. – P. 229–242.
3. Wang L. Cold-formed steel channel sections with web stiffeners subjected to local and distortional buckling – Part II: parametric study and design rule / L. Wang, B. Young // 22nd International specialty conference on cold formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. - P. 243–258.
4. Wang L. Design of cold-formed steel channels with stiffened webs subjected to bending / L. Wang, B. Young // Thin-Walled Structures. – 2014. -№ 85. – P. 81–92.
5. Wang T. Calculation for moment capacity of beam-to-upright connections of steel storage pallet racks / T. Wang, X. Zhao, Y. Chen // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, StLouis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 587–600.
6. Zhao X. Laser scanning to develop three-dimensional fields for the precise geometry of cold formed steel members / X. Zhao, B.W. Schafer // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 97–114.
7. Zhao X. Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections / Xianzhong Zhao, Tuo Wang, Yiyi Chen, K.S. Sivakumaran // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. - №99. – P. 161–175. 414. Zhou X.H. Study on the flexural capacity of cold-formed steel joists-OSB composite floors / X. H. Zhou, Y. Shi, R. C. Wang, Y. J. Liu // 22nd International specialty conference on cold formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 495–511.

8. Xu L. Compressive strength of cold formed steel C-shape columns with slotted holes / L. Xu, Y. Shi, S. Yang // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 157–170.
9. Young B. Cold-formed steel lipped channel columns influenced by local-distortional interaction: strength and DSM design / B. Young, N. Silvestre, D. Camotim // Journal of Structural Engineering. – 2013. - №139(6). – P. 1059-1074.
10. Yuan X.L. Simplified seismic design for midrise buildings with vertical combination of cold-formed steel and concrete framing / X.L. Yuan, L. Xu // 22nd International specialty conference on cold-formed steel design and construction, St Louis, MO, 5–6 November 2014, Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology. – 2014. – P. 617–632.
11. Григорій Сучков, Руслан Мигущенко, Сергій Плєснецов, Андрій Донченко, Юрій Кошкаров, Вадим Тимофєєв. Дослідження та розробка комбінованого методу зменшення величини неконтрольованого приповерхневого шару при ультразвуковому електромагнітно-акустичному контролі феромагнітних металовиробів. Український метрологічний журнал. №3 2025. С. 16 - 21

УДК 004.89:378.147

П.І. Сагайда[1], І.О. Ільяшенко[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ФОРМУВАННЯ ЗМІСТУ ДИСЦИПЛІН ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНИХ ПРОГРАМ У ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

Анотація. У тезах представлено результати дослідження, метою якого є розробка концептуальної моделі та функціональних вимог до інформаційної системи (ІС) для підтримки формування та оптимізації змісту навчальних дисциплін освітньо-професійної програми (ОПП) «Комп'ютерні науки» в технічному університеті. Запропонований підхід інтегрує компетентнісну модель (на основі результатів навчання та таксономії Блума) з експертними методами (Дельфі, Аналіз ієрархій – AHP). Реалізований прототип ІС дозволить забезпечити узгодження змісту програми з міжнародними стандартами (ACM/IEEE, SFIA), аналіз покриття компетенцій і автоматизацію процесу розробки навчального плану.

Ключові слова: *освітньо-професійна програма (ОПП), компетентнісний підхід, зміст дисциплін, Аналіз ієрархій (AHP), метод Дельфі, матриця компетенцій, інформаційна система, ACM/IEEE, SFIA*.

Вступ. Сучасні вимоги IT-індустрії та перехід до компетентнісно-орієнтованих освітніх моделей вимагають системного та формалізованого підходу до проєктування змісту навчальних дисциплін [1]. Формування змісту дисциплін має бути узгоджене з очікуваннями роботодавців та міжнародними рамками, такими як ACM/IEEE Computing Curricula [2,3] та SFIA (Skills Framework for the Information Age) [4], що підвищує конкурентоспроможність випускників. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки

цифрових інструментів та методів, які б забезпечили автоматизований аналіз та корекцію навчальних програм за критеріями ефективності та прозорості.

Постановка задачі. Основна задача полягає в розробці концептуальної моделі та багаторівневої архітектури програмної системи, здатної підтримувати процес формування змісту дисциплін ОПП «Комп'ютерні науки». Це включає:

- Формалізацію теоретичних основ контентного моделювання (результати навчання, компетентності, таксономія Блума [3]).
- Створення математичних моделей для оптимального розподілу навчального часу, побудови логічної послідовності вивчення (передумови) та забезпечення покриття необхідних компетенцій.
- Застосування методів AHP, Дельфі та кластеризації для структуризації та ранжування навчальних компонентів за значущістю.

Основний зміст роботи

1. Концептуальна модель та архітектура системи

Концептуальна модель ОПП базується на компетентнісній матриці, яка фіксує, які дисципліни і на якому рівні (введення, формування, поглиблене опанування) формують конкретні цільові компетенції.

Багаторівнева архітектура ІС включає:

– презентаційний рівень (веб-інтерфейс) для вводу даних експертами та візуалізації результатів;

– логічний рівень (сервіси та алгоритми): модулі оптимізації навчального плану, обробки експертних оцінок (Delphi, AHP), кластеризації;

– рівень даних: сховище інформації (курси, компетенції, матриці відповідностей, експертні оцінки), що може бути реляційною (PostgreSQL) або графовою (Neo4j) СУБД.

2. Математичні та експертні методи

Для формування та оптимізації змісту ОПП застосовані моделі та методи, які представлено у табл. 1.

3. Експериментальні результати та DSS

Прототип ІС був протестований на ОПП «Комп'ютерні науки». Оптимізаційний модуль рекомендував перерозподіл годин, щоб покрити недостатньо представлені компетентності (наприклад, пов'язані з інтелектуальним аналізом даних). Статистичний аналіз (t-тест з $p<0.05$) підтвердив, що оптимізовані пропозиції стійко покращують сумарний бал покриття компетенцій.

Система містить модуль підтримки прийняття рішень, який надає рекомендації за моделлю «дерева рішень». Наприклад, при виявленні розривів у матриці компетенцій система пропонує гілки рішень: «додати курс X» або «змінити зміст курсу Y». Для оцінки якості ОПП використовуються KPI та радарна діаграма, що візуалізує метрики «сильних» і «слабких» сторін програми.

Таблиця 1

Моделі та методи для формування та оптимізації змісту ОПП

Модель/Метод	Призначення
Послідовність вивчення	Графові моделі (орієнтовані ациклічні графи) для топологічного впорядкування курсів з урахуванням передумов та пріоритетів.
Компетентнісне покриття	Матриця M_{ij} (дисципліни-компетентності) для перевірки, чи забезпечують заплановані курси досягнення всіх цільових компетентностей на необхідному рівні.
Метод AHP	Ранжування дисциплін та критеріїв за допомогою попарних порівнянь експертами для отримання узгоджених пріоритетів.
Метод Дельфі	Ітеративне анонімне опитування експертів для досягнення консенсусу щодо невідомих параметрів (наприклад, майбутніх вимог до компетенцій).
Кластеризація	Групування дисциплін за схожими характеристиками для виявлення "комплексів" курсів та оптимізації структури програми.

Наукова новизна. Запропоновано багаторівневий підхід, що інтегрує компетентнісну модель з експертними та оптимізаційними методами. Вперше синтезовано міжнародні стандарти ACM/IEEE та SFIA з адаптивними алгоритмами формування змісту, реалізовано це у програмному рішенні із завершеною аналітичною моделлю. Система також впроваджує механізм безперервного вдосконалення (PDCA-цикли), що дозволяє адаптувати ОПП на основі моніторингу KPI та змін ринкових вимог.

Висновки. Розроблена концептуальна модель та інформаційна система ефективно поєднують математичні та експертні методи для формування та оптимізації змісту дисциплін ОПП «Комп’ютерні науки». Система буде здатна:

– автоматизувати значну частину процесу планування, підвищуючи його прозорість та ефективність;

– підвищити якість освіти, зробивши її більш орієнтованою на потреби ринку праці та узгодженою з міжнародними стандартами;

– надати інструменти прийняття рішень для виявлення прогалин у компетентностях та пропозиції корекційних дій.

У подальших дослідженнях планується масштабування моделі на інші технічні спеціальності та розширення за рахунок модулів машинного навчання для прогнозування успішності змін та персоналізації освіти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Preecha Tangworakitthaworn P., Lester Gilbert L., and Gary B. Wills G.B.. ILO Diagram: A Conceptual Model for Curriculum Development. *IEEE Technology and Engineering Education (ITEE).* 2013. Vol. 8, No. 3. P. 12-19.
2. Computing Curricula 2020. Paradigms for Global Computing Education. URL : https://www.acm.org/binaries/content/assets/education/curricula-recommendations/cc2020.pdf
3. Computer Science Curricula 2023 / Kumar A.N. at al. Association for Computing Machinery : New York, 2024. 459 p. DOI : https://doi.org/10.1145/3664191
4. SFIA - the global skills and competency framework for the digital world. URL : https://sfia-online.org/en.

УДК 004.8

В.В. Спірінцев[1], К.Г. Приліпко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АДМІНІСТРУВАННЯ ОСВІТНЬО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Анотація. В роботі запропоновано підхід до розв'язання проблеми високого операційного навантаження на працівників деканату під час обробки масових типових запитів, особливо пов'язаного з обслуговуванням чисельного контингенту здобувачів освіти великих факультетів. Представлене рішення полягає у розробці та впровадженні інтегрованої комунікаційної системи. Зокрема, запропоновано архітектуру, що поєднує три ключові компоненти: месенджер Telegram як фронтенд, платформу автоматизації n8n як ядро бізнес-логіки, та велику мовну модель (LLM) у якості інтелектуального обробника неструктурованих запитів. Такий підхід дозволяє автоматизувати до 90% рутинних комунікацій, забезпечити цілодобову підтримку здобувачів освіти та суттєво знизити навантаження на персонал деканату.

Ключові слова: *штучний інтелект (ШІ), велика мовна модель (LLM), n8n, Telegram-бот, автоматизація, оптимізація процесів, деканат, комунікація, no-code.*

Вступ. В умовах глобальної цифровізації та утвердження у суспільстві сервісно-орієнтованої парадигми кардинально трансформуються очікування споживачів послуг. Ця модель, що ставить в центр клієнта (споживача) та його досвід, неминуче проєктується і на сферу вищої освіти. Сучасний університет стикається з технологічно грамотними здобувачами освіти, які очікують від інституцій такого ж рівня сервісу, які вони отримують від банків, ритейлу чи бізнес компаній: миттєвого доступу до інформації, персоналізованої підтримки та доступності 24/7. У цьому контексті швидкість та якість комунікації між адміністрацією та здобувачами освіти перетворюються з допоміжної функції на один із критично важливих факторів конкурентоспроможності закладу вищої освіти та загального рівня задоволеності здобувачів освіти.

Центральною ланкою цієї комунікації традиційно виступає деканат. Однак, саме він найчастіше стає обмежуючим фактором у системі. Використання традиційних каналів зв'язку (телефон, електронна пошта, особисті візити) в якості основної моделі комунікації демонструє свою крайню неефективність. Проблема набуває особливої гостроти в періоди пікового навантаження: початок семестру, вступна кампанія, поселення в гуртожитки, і особливо – сесія. Дослідження робочого процесу показує, що левова частка (до 80-90%) цього комунікаційного навантаження складається з однотипних, рутинних запитань: «Який розклад іспитів?», «Яка процедура отримання довідки про навчання?», «Які години прийому декана?». Це створює дві фундаментальні проблеми. По-перше, для здобувачів освіти: вони не можуть отримати миттєву допомогу.

Інформація, яка потрібна їм "тут і зараз" (наприклад, ввечері під час підготовки до іспиту), виявляється недоступною, оскільки деканат працює лише в робочі години. Це викликає стрес та знижує ефективність навчального процесу. По-друге, для персоналу деканату: постійне "перемикання контексту" на низькорівневі запити призводить до катастрофічного зниження продуктивності праці. Секретарі не можуть зосередитися на виконанні своїх безпосередніх, складних адміністративних завдань (підготовка наказів, ведення документації, робота з викладачами), що, в свою чергу, призводить до помилок, затримок у документообігу та професійного вигорання.

Таким чином, виникає гостра, актуальна потреба у реінжинірингу цього процесу: необхідна система, яка б зняла з персоналу тягар рутинних запитів і водночас надала здобувачам освіти миттєвий, цілодобовий та зручний канал доступу до необхідної інформації.

Визначення проблеми. Головна проблема полягає у відсутності єдиного, автоматизованого та інтелектуального інструменту для обробки студентських запитів. Поточна система, що покладається на ручну обробку запитів секретарями (через пошту, Telegram чи особисті візити), є неефективною. Вона не масштабується, обмежена робочим часом (9:00-17:00) і призводить до тривалих затримок, особливо коли персонал завантажений іншими адміністративними завданнями. Існуючі рішення для автоматизації часто є простими чат-ботами з жорстко прописаними сценаріями (rule-based). Вони здатні розпізнавати лише точні ключові слова (напр., "Розклад", "Довідка"). Будь-який нетиповий запит (напр., *"Я захворів під час сесії і пропустив два іспити, які документи мені потрібно зібрати і які мої подальші дії?"*) призводить до комунікаційного тупику. Такі боти не здатні на семантичний аналіз і ведення діалогу. З іншого боку, в університеті можуть існувати складні внутрішні CRM-системи або портали для документообігу. Однак вони не інтегровані у звичні для здобувачів освіти канали комунікації. Здобувачі освіти не хочуть встановлювати окремий додаток, згадувати пароль до порталу чи розбиратися у складному інтерфейсі. Таким чином, виникає розрив: адміністрація має інструмент, яким здобувачі освіти не користуються, бо він незручний. Таким чином, для вирішення низки виявлених проблем, в роботі пропонується створення системи, яка поєднує: простоту інтерфейсу (Telegram), щоб забезпечити студентам низький поріг входу та миттєвий доступ з мобільного пристрою; гнучкість людського спілкування (LLM), щоб розуміти неструктуровані запити, контекст діалогу, аналізувати складні ситуації та надавати змістовні відповіді, імітуючи розмову з компетентним співробітником; потужність автоматизації (n8n), який пов'язує Telegram та LLM, маршрутизує запити, підключається до баз даних для відповіді на прості запити і передає складні запити на обробку ШІ, забезпечуючи безшовний робочий процес.

Основний зміст роботи. Для зниження операційного навантаження на секретаріат деканату та забезпечення миттєвого фідбеку для здобувачів освіти

розроблена інтегрована комунікаційна система, яка є гнучким поєднанням трьох ключових технологій, кожна з яких виконує чітко визначену роль:

1. Рівень представлення (Front-End) – Telegram: використовується єдиний офіційний бот-акаунт (@dekanatFIT_bot), що виступає єдиною точкою входу для всіх здобувачів освіти. Кожен здобувач освіти взаємодіє з ботом у приватному чаті "тет-а-тет". Це забезпечує повну конфіденційність запитів (наприклад, щодо академзаборгованості чи особистих заяв) та усуває інформаційний "шум" загальних чатів.
2. Рівень логіки та автоматизації (Middleware) – n8n: платформа n8n виступає як "серце" та ядро бізнес-логіки системи. Вона підключена до API Telegram через вузол Telegram Trigger і отримує кожне повідомлення, що надходить боту. n8n відповідає за повну оркестрацію процесу: маршрутизацію запитів, взаємодію з джерелами даних (Google Sheets) та виклик інтелектуального компонента (Gemini).
3. Рівень інтелекту (Processing) – Gemini (LLM): використовується API великої мовної моделі Gemini. Цей компонент не генерує відповіді напряму, а виконує ключову функцію первинного сортування та аналізу семантики. Він класифікує кожний запит і повертає в n8n структуровані дані.
4. Джерело даних (Data Source) – гібридна модель джерел даних для обробки різних типів інформації:

- Сайт університету: виступає як першоджерело для офіційних, статичних даних. Зокрема, Excel-файли з розкладом, які періодично оновлюються, завантажуються саме звідси.
- Google Drive (Файлове сховище): використовується для зберігання вхідних файлів від здобувачів освіти. Коли здобувач освіти надсилає фото заяви, система (після OCR-аналізу) автоматично завантажує цей файл у відповідну папку на Google Drive, синхронізовану з ПК секретаря.

Алгоритм обробки запитів. Робота системи базується на покроковому алгоритмі обробки вхідного повідомлення:

1. Отримання запиту: здобувач освіти формує своє питання у приватний чат з ботом в межах Telegram.
2. Миттєва фіксація: система n8n (яка підключена до бота) миттєво "ловить" це повідомлення та фіксує, хто саме його надіслав (отримує унікальний контакт здобувача освіти).
3. Первинний аналіз: n8n одразу надсилає текст запиту до ШІ (Gemini) з простим завданням: "Проаналізуй це питання і скажи, до якої категорії воно належить".
4. Вибір сценарію: залежно від висновку, який зробив ШІ, система n8n автоматично обирає один із трьох сценаріїв подальшої дії:

- Сценарій 1: простий структурований запит. Якщо ШІ розпізнав запит як простий (наприклад, про розклад), він визначає ключові деталі (номер групи та день). Тоді n8n самостійно звертається до підключеної Google-таблиці (яка

слугує базою даних розкладу), знаходить там потрібний рядок і миттєво надсилає здобувачу освіти готову відповідь у Telegram.

- Сценарій 2: складний неструктурований запит. Якщо запит вимагає детальної консультації, n8n знову звертається до ШІ, але вже з іншим завданням – дати повну, змістовну відповідь. ШІ генерує таку відповідь, спираючись на закладені в нього внутрішні правила та інструкції деканату, після чого n8n відправляє це роз'яснення здобувачу освіти.
- Сценарій 3: передача питання людині (Ескалація). Якщо запит є скаргою, дуже особистим, або ШІ розуміє, що не може дати коректну відповідь, він дає системі n8n спеціальний сигнал ("потрібне втручання людини"). В такому випадку запускається окремий процес для передачі цього питання безпосередньо секретарю деканату.

Модель "Human-in-the-loop" (Ескалація). Описана в Сценарії 3 модель є ключовою для збереження якості сервісу. При отриманні FLAG_FOR_HUMAN, n8n виконує дві паралельні дії:

1. Інформування здобувача освіти: негайно відправляє повідомлення здобувачу освіти (в його chat_id): "Це складне питання. Я негайно передаю його секретарю. Вам нададуть відповідь особисто."
2. Ескалація секретарю: негайно відправляє повідомлення в окремий, приватний "ескалаційний" чат (де знаходяться тільки секретар і бот). Повідомлення містить ім'я здобувача освіти (@username) та повний текст його запиту.

Це дозволяє секретарю бачити лише 10% складних запитів, які відфільтрував бот, і реагувати на них вручну.

Обробка специфічних випадків (Файли). Система також обробляє файли (напр., фотокопії заяв):

1. Здобувач освіти надсилає фото заяви. Вузол Telegram Trigger налаштований на завантаження вкладень (Download Attachments).
2. n8n передає бінарні дані файлу в мультимодальний API Gemini для OCR (оптичного розпізнавання тексту) та аналізу.
3. Gemini повертає розпізнаний текст та його суть (напр., "Заява на академвідпустку від Іванова І.І.").
4. n8n автоматично зберігає файл у відповідну папку на Google Drive (яка синхронізована з ПК секретаря) та відправляє здобувачу освіти підтвердження: "Вашу заяву прийнято в обробку".

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у розробці та обґрунтуванні гібридної архітектурної моделі для автоматизації комунікаційних процесів у закладах вищої освіти. На відміну від існуючих підходів, які, як правило, є або простими *rule-based* чат-ботами, що не здатні обробити нетиповий запит, або покладаються на людську працю, що призводить до низької швидкості, або є монолітними CRM-системами, дорогими у впровадженні, запропонована модель базується на синергії трьох гнучких компонентів.

Доступний месенджер (Telegram) використовується як повноцінний Front-End, що забезпечує нульовий поріг входу для студента. No-code платформа (n8n) виступає ядром бізнес-логіки (Middleware), виконуючи роль динамічного оркестратора, що маршрутизує запити, підключається до різнорідних джерел даних та виконує інтелектуальний тріаж. Велика мовна модель (LLM) використовується як інтелектуальний класифікатор на етапі тріажу, інструмент OCR та генератор відповідей, що дозволяє здійснювати глибокий семантичний аналіз неструктурованих запитів. Комбінація цих трьох доступних технологій дозволяє створювати масштабовані, гнучкі та "розумні" комунікаційні системи з мінімальними витратами на розробку програмного коду, при цьому забезпечуючи високу якість обробки запитів.

Висновки. У роботі розкрито вирішення актуальної проблеми низької ефективності комунікації між працівниками деканату та здобувачами освіти. Встановлено, що ключовою причиною є високе операційне навантаження на секретарів, яке, в свою чергу, спричиняє низьку швидкість надання відповідей на запити. Для оптимізації цих процесів у роботі запропоновано проєктування та розробка інтегрованого програмниого фреймворку, який допоможе автоматизувати та інтелектуалізувати взаємодію. Система базується на тісній інтеграції месенджера Telegram (як фронтенд), no-code платформи n8n (як ядро логіки та автоматизації) та ШІ в якості LLM Gemini (як інтелектуальний обробник та класифікатор).

Впровадження запропонованого рішення дозволяє досягти ключових результатів: забезпечити миттєву обробку запитів здобувачів освіти у режимі 24/7, що кардинально підвищує рівень сервісу; автоматизувати до 90% типових та рутинних питань, що складають основний потік звернень; надавати якісні, семантично-обґрунтовані відповіді на складні та нетипові запити завдяки LLM; знизити операційне навантаження на секретарів деканату. Останнє має прямий організаційний ефект, оскільки вивільняє час кваліфікованих співробітників для виконання складних адміністративних та аналітичних завдань. Крім того, система успішно реалізує складну логіку, таку як OCR-розпізнавання фото-заяв та їх автоматичне сортування.

Подальший розвиток досліджень доцільно здійснювати у напрямках поглибленої інтеграції з внутрішніми базами даних університету для надання персоналізованої інформації про успішність чи фінанси; аналізу зібраних даних для виявлення "гарячих точок" та проблемних місць для ще більшої точності відповідей.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рекомендації щодо відповідального впровадження та використання технологій штучного інтелекту в закладах вищої освіти. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/news/2025/04/24/shi-v-zakladakh-vyshchoi-osvity-24-04-2025.pdf
2. n8n. [Electronic resourse]. – Access mode: https://n8n.io/integrations/google-sheets/and/telegram/

3. Creating Your First n8n Workflow: From Telegram to Blog in Minutes. [Electronic resourse]. – Access mode: https://medium.com/@mandeepdhakal11/creating-your-first-n8n-workflow-from-telegram-to-blog-in-minutes-80c05ddb55f3
4. Telegram Bot API. [Electronic resourse]. – Access mode: https://core.telegram.org/bots/api
5. Bot API. [Electronic resourse]. – Access mode: https://grammy.dev/uk/guide/api
6. Self-hosting n8n. [Electronic resourse]. – Access mode: https://docs.n8n.io/hosting/
7. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://goit.global/ua/articles/ohliad-n8n-konstruktor-avtomatyzatsii-ta-intehratsii/
8. Використання чат-ботів на основі великих мовних моделей у науково-педагогічній діяльності викладачів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/380184525_VIKORISTANNA_CAT-BOTIV_NA_OSNOVI_VELIKIH_MOVNIH_MODELEJ_U_NAUKOVO-PEDAGOGICNIJ_DIALNOSTI_VIKLADACIV

УДК 004.415.2:004.738.5

С.К. Добряк[1], С.С Гурковська[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА З ВИКОРИСТАННЯМ WEB-ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Представлено комплексну платформу віртуального лабораторного стенда, що поєднує емуляцію мікроконтролера AVR, моделі периферійних пристроїв та веб-інтерфейс для інтерактивної взаємодії. Розглянуто архітектуру емулятора, підтримку зовнішніх модулів, клієнт-серверний режим роботи та можливість інтеграції зі середовищем Arduino. Платформа забезпечує відтворення роботи апаратних систем без використання фізичного обладнання, що підвищує доступність і ефективність навчального процесу.

***Ключові слова**: віртуальний лабораторний стенд, емулятор, AVR, веб-технології, клієнт-сервер, периферійні модулі, інтерактивне навчання.*

Вступ. Розвиток сучасних освітніх технологій та поява доступних онлайн-інструментів створили умови для широкого застосування віртуальних лабораторій у підготовці фахівців технічних спеціальностей. Віртуальні стенди дають змогу імітувати роботу реальних апаратних систем, проводити експерименти, тестувати алгоритми та вивчати взаємодію апаратних компонентів без необхідності використання фізичного обладнання [1][2]. У межах проєкту було розроблено комплексний віртуальний лабораторний стенд, що поєднує емулятор мікроконтролера AVR, набір периферійних модулів та веб-інтерфейс для взаємодії з користувачем.

Постановка задачі. Метою роботи є створення віртуального лабораторного стенда, який забезпечує повноцінну емуляцію мікроконтролера AVR, моделювання периферійних пристроїв, можливість інтеграції компонентів

у єдину систему та доступ користувачів через веб-технології, з підтримкою режимів графічного відображення та клієнт-серверної архітектури [3].

Основний зміст роботи. Створений віртуальний лабораторний стенд базується на реалізації емулятора мікропроцесорного ядра з набором AVR команд. Основою для моделювання є інтерпретація набору команд AVR, що включає арифметичні, логічні, керуючі та інші типи інструкцій. Емулятор відтворює роботу регістрів, стеку, лічильника команд, механізмів переривань, необхідних для коректного функціонування прикладних програм, створених користувачами. Завдяки відтворенню архітектури AVR у програмній моделі забезпечується сумісність з прошивками, що розробляються для мікроконтролерів цієї платформи [4] в середовищі розробки Arduino.

Крім центрального процесора, було реалізовано набір периферійних модулів, які традиційно використовуються в мікроконтролерних системах: порти вводу-виводу, таймери, UART, SPI. Порти вводу-виводу підтримують режими роботи з цифровими лініями, включаючи читання станів, керування вихідними сигналами. Таймери моделюються з урахуванням справжніх частот відліку. UART та SPI відтворюють послідовну передачу даних у режимах master/slave [5][6].

Особливістю розробленого стенда є широка підтримка зовнішніх цифрових компонентів, що можуть підключатися до мікроконтролера. Серед них -- кнопки, світлодіоди, зсувні регістри 74HC595, 74HC165, 74HC589, контролер світлодіодних матриць MAX7219, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі, мікросхема реального часу та графічний дисплей. Для кожного з модулів було створено окрему модель, яка взаємодіє з емітованими портами вводу-виводу, забезпечуючи реалістичну поведінку системи. Наприклад, модуль 74HC595 дозволяє передавати дані в паралельних шинах через послідовний інтерфейс, MAX7219 дає змогу формувати відображення на світлодіодних матрицях, а RTC моделює хід часу, враховуючи різні параметри роботи [7].

Для забезпечення комплексності лабораторного стенда реалізовано механізм об’єднання всіх модулів у єдине інтегроване середовище. Компоненти можуть взаємодіяти між собою як у фізичній системі: мікроконтролер передає дані на периферію, периферія змінює свої стани, зовнішні сигнали впливають на перебіг виконання програм. Це дозволяє створювати навчальні сценарії, лабораторні роботи, демонстраційні проєкти та моделювати складні електронні системи без використання реального обладнання [8].

Базовий емулятор було реалізовано мовою програмування C, що забезпечує високу швидкість роботи та портативність. Для підвищення зручності інтеграції у різні проєкти було створено програмні інтерфейси, які дозволяють використовувати емулятор із мов програмування Python і Java. Це розширює можливості застосування стенда: він може бути інтегрований у навчальні середовища, інструменти автоматизації, віддалені лабораторії тощо [9].

Значущою частиною проєкту стала розробка веб-інтерфейсу та клієнт-серверного режиму роботи. Емулятор може працювати як сервер, передаючи клієнту мета-інформацію про стан модулів і внутрішніх регістрів. У цьому

режимі браузер відповідає за графічне представлення системи, включаючи візуалізацію модулів, кнопок, світлодіодів, регістрів та дисплеїв. Такий підхід дозволяє реалізувати сучасний інтерактивний інтерфейс без залежності від специфічного програмного забезпечення. Крім того, існує режим генерації графічного подання на сервері з передаванням готової картинки клієнту через VNC-протокол. Це дає змогу використовувати віртуальний стенд у середовищах, де веб-інтерфейси працюють обмежено або потребують сумісності з існуючими інструментами віддаленого доступу [10].

Розроблений стенд підтримує інтеграцію з Arduino IDE. Це дозволяє студентам та розробникам створювати та компілювати програми для емітованого мікроконтролера із використанням звичних інструментів. Після компіляції прошивка завантажується в емулятор, який відтворює поведінку програми. Такий підхід дозволяє уникнути потреби у фізичних мікроконтролерах, що значно знижує витрати на організацію навчального процесу.

Загалом створений віртуальний стенд забезпечує можливість моделювання різних рівнів мікроконтролерних систем -- від виконання інструкцій ЦП до взаємодії з периферійними цифровими пристроями та графічними дисплеями. Комбінація програмної емуляції, клієнт-серверної архітектури та веб-технологій створює інноваційний інструмент для дистанційного навчання, досліджень і практичної роботи з мікроконтролерними системами.

Наукова новизна роботи полягає у створенні комплексної платформи, що поєднує емуляцію мікропроцесорного ядра, периферійних модулів і веб-інтерфейсу в єдиному середовищі, забезпечуючи інтеграцію апаратної та програмної моделі та підтримку декількох режимів графічного подання результатів.

Висновки. У роботі наведено підхід до розробки віртуального лабораторного стенда, що забезпечує моделювання мікроконтролерних систем, інтеграцію з периферією, підтримку веб-технологій та можливість віддаленої взаємодії. Запропонована платформа може бути ефективно використана у навчальному процесі, дистанційних курсах і прикладних дослідженнях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Balamuralithara B., Woods P. Virtual laboratories in engineering education: the simulation lab and remote lab // Computer Applications in Engineering Education. – 2009. – Vol. 17. – P. 108–118. – DOI: https://doi.org/10.1002/cae.20186
2. Zutin D., Auer M. Online Engineering and Remote Laboratories. Springer, 2011.
3. Ally M. (Ed.). Mobile and Web-Based Learning. Athabasca University Press, 2009.
4. Microchip Technology Inc. AVR Instruction Set Manual. Chandler (AZ), 2020.
5. Axelson J. Serial Port Complete: COM Ports, USB Virtual COM Ports, and Ports for Embedded Systems. Lakeview Research, 2007.
6. Gajski D., Abdi S., Gerstlauer A., Schirner G. Embedded System Design: Modeling, Synthesis and Verification. Springer, 2009.
7. Harris D., Harris S. Digital Design and Computer Architecture. Morgan Kaufmann, 2015.
8. Kopetz H. Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Springer, 2011.

9. King S. T., Dunlap G. W., Chen P. M. Operating system support for virtual machines. *Proceedings of the 2003 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 03).* San Antonio, TX, USA, June 2003. Berkeley, CA : USENIX Association, 2003. URL : https://www.usenix.org/conference/2003-usenix-annual-technical-conference/operating-system-support-virtual-machines (дата звернення: 17.11.2025).
10. Keim D., Andrienko G., Fekete J. D., Görg C., Kohlhammer J., Melançon G. Visual Analytics: Definition, Process, and Challenges. // Kerren A., Stasko J. T., Fekete J. D., North C. (eds). *Information Visualization. Lecture Notes in Computer Science*. 2008. Vol. 4950. Berlin; Heidelberg: Springer. P. 154–175. DOI: 10.1007/978-3-540-70956-5_7.

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], А.В. Клименко[1], В.О. Проценко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СТВОРЕННЯ ВЕБДОДАТКУ ЧАТМЕСЕНДЖЕРА ДЛЯ ЗРУЧНОЇ РОБОТИ З КОРИСТУВАЧАМИ СИСТЕМИ ПРАЦЕВЛАШТУВАННЯ

Анотація. У даній роботі розглянуто процес розроблення вебплатформи для централізованої комунікації між HR-відділом компанії та кандидатами, які звертаються через Telegram-ботів. Основна увага приділена проєктуванню архітектури системи, вибору технологій, реалізації клієнтської та серверної частин, а також інтеграції з месенджером Telegram.

Ключові слова: *React, TypeScript, Node.js, Aiogram, Python, PostgreSQL, вебплатформа, чат, Telegram-бот, HR-система.*

Вступ. У сучасному світі цифрових технологій автоматизація процесів комунікації між компаніями та кандидатами на працевлаштування набуває дедалі більшого значення. Ефективна взаємодія з потенційними співробітниками є ключовим чинником успіху для будь-якої організації. Тому створення інструментів, які дозволяють оптимізувати роботу HR-відділів і забезпечити зручне управління процесом спілкування з кандидатами, є актуальним завданням.

Основний зміст роботи. В рамках опанування дисципліни Web-технології та web-дизайн було розроблено вебпроєкт для вигаданої компанії відбору кандидатів на працевлаштування, адаптований до різних пристроїв із використанням динамічного розташування блоків за допомогою CSS. Він дозволяє об’єднати всю комунікацію з потенційними кандидатами на працевлаштування, що звертаються до компанії через Telegram-ботів у єдиній системі. Кожен працівник має доступ до чатів, може спілкуватися з кандидатами, переглядати історію листування, а адміністратори – керувати ботами, працівниками та шаблонами відповідей.

Клієнтська частина створена за допомогою React та TypeScript. Front-end містить дві головні сторінки: «Інтерфейс чату» – для спілкування з кандидатами та «Адмінпанель» – для адміністрування обліковими записами системи.

Основні функції розробленого вебдодатку:

– авторизація користувачів за логіном і паролем;
– відображення списку чатів із кандидатами;
– відправка текстових повідомлень, емодзі, зображень і файлів;
– можливість створення та використання шаблонів відповідей.

Серверна частина написана, використовуючи Node.js; об'єктно-реляційна система керування базами даних PostgreSQL. Back-end відповідає за обробку запитів із клієнтської частини, автентифікацію користувачів, зберігання даних і взаємодію з базою даних.

Для розробки даного вебпроєкту було використано технології, що описано нижче.

React та TypeScript – для створення інтерфейсу користувача.

React – це сучасний JavaScript-фреймворк, для створення динамічних, масштабованих та високопродуктивних інтерфейсів користувача. Його основною концепцією є компонентний підхід, за якого інтерфейс поділяється на незалежні модулі – компоненти, кожен із яких має власну логіку, структуру та стиль. Це забезпечує високу гнучкість, повторне використання коду та спрощує підтримку великих програмних проєктів.

TypeScript – це сучасна мова програмування, яка є надбудовою над JavaScript і розширює його можливості за рахунок суворої типізації. Вона забезпечує розробників інструментами для створення більш стабільного, передбачуваного та безпечного коду. Основна ідея TypeScript полягає в тому, щоб додати до JavaScript систему типів, яка дозволяє виявляти помилки ще на етапі розробки, до запуску програми, що суттєво підвищує якість програмного забезпечення.

Node.js – для серверної логіки.

Node.js – це високопродуктивне середовище виконання JavaScript, яке дозволяє запускати JavaScript не лише в браузері, а й на стороні сервера. Його основна мета – забезпечити ефективну розробку швидких, масштабованих і асинхронних серверних застосунків. Завдяки своїй архітектурі Node.js став одним із ключових інструментів сучасної веброзробки, особливо у побудові backend-частини вебсервісів.

Aiogram – для обробки повідомлень ботів від ботів.

Фреймворк Aiogram побудований на основі асинхронної моделі (asyncio), що забезпечує високу швидкість обробки повідомлень і дозволяє одночасно працювати з великою кількістю користувачів без затримок. Завдяки цьому боти, створені на Aiogram, здатні обробляти запити в режимі реального часу, ефективно реагувати на події та взаємодіяти з користувачем без перевантаження сервера. Однією з головних переваг Aiogram є мінімальне споживання ресурсів і

висока продуктивність. Завдяки асинхронності бот може паралельно обробляти сотні повідомлень, що робить його придатним для великих проєктів, у яких важлива швидкість реакції.

PostgreSQL – для зберігання даних.

PostgreSQL – це потужна, об’єктно-реляційна система керування базами даних (СКБД) з відкритим вихідним кодом, яка вважається однією з найнадійніших і технологічно розвинених у світі. Вона використовується для зберігання, організації та обробки великих обсягів структурованих даних і є стандартом для корпоративних, аналітичних та вебсистем. PostgreSQL поєднує стабільність, безпеку та масштабованість, що робить її універсальним рішенням для різноманітних проєктів – від невеликих застосунків до складних розподілених систем. На рис.1 наведено структуру розробленого messenger-а у PostgreSQL.

```
messengerSiteDB=# \dt
                List of tables
 Schema |       Name       | Type  |  Owner
--------+------------------+-------+----------
 public | answer_templates | table | postgres
 public | bots             | table | postgres
 public | chat_overview    | table | postgres
 public | chats            | table | postgres
 public | clients          | table | postgres
 public | managers         | table | postgres
 public | subscriptions    | table | postgres
(7 rows)
```

Рис. 1. Структура бази данних PostgreSQL для вебплатформи

На рис. 2 зображений інтерфейс головної сторінки вебдодатку.

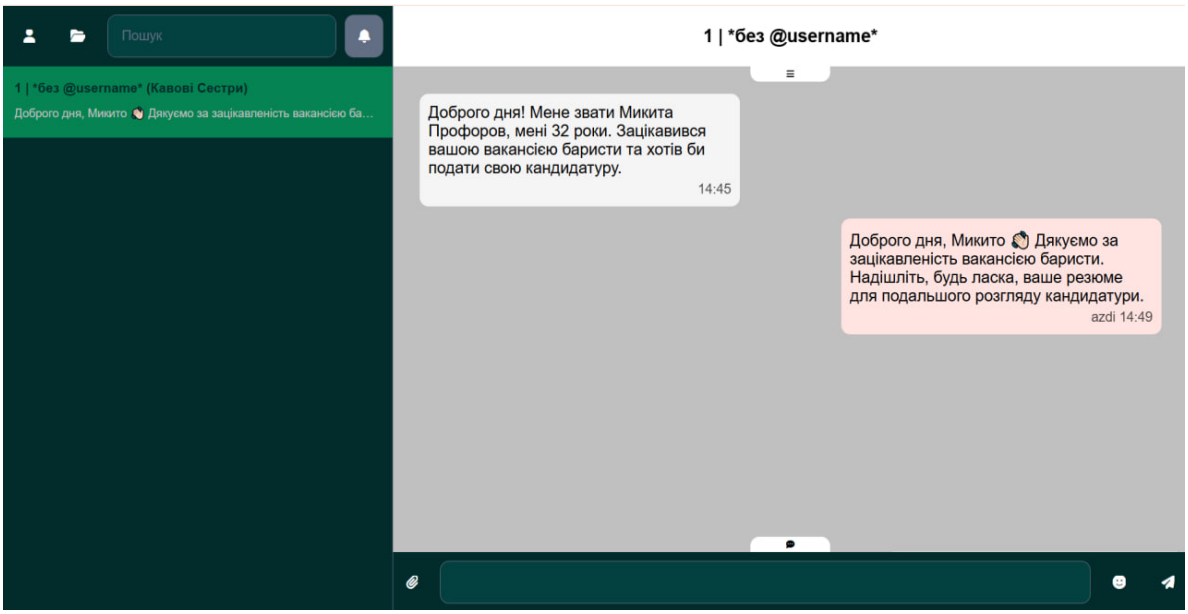


Рис. 2. Зовнішній вигляд головної сторінки листування

Висновки. У результаті розробки вебплатформи було продемонстровано, що поєднання сучасних технологій React, TypeScript, Node.js, Aiogram для Python та PostgreSQL дозволяє створити ефективний, стабільний і масштабований вебсервіс для взаємодії HR-команди з кандидатами на працевлаштування. Завдяки використанню React та TypeScript вдалося реалізувати зручний і динамічний інтерфейс користувача, який легко адаптується під різні пристрої. Node.js забезпечив швидку обробку запитів і стабільну роботу серверної частини, тоді як фреймворк Aiogram дозволив інтегрувати систему з Telegram-ботами та забезпечити обмін повідомленнями в режимі реального часу. База даних PostgreSQL гарантує надійне зберігання інформації, цілісність даних та можливість масштабування системи в майбутньому. Загалом, поєднання цих технологій дало змогу створити функціональний вебсервіс, який автоматизує комунікацію між HR-командою та кандидатами, підвищує ефективність обробки заявок і покращує якість взаємодії з користувачами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. GACKENHEIMER, Cory. Introduction to React. Apress, 2015.
2. VAN ROSSUM, Guido; DRAKE, Fred L. An introduction to Python. Network Theory Ltd., 2011. 115 p.
3. PIROZZI, Enrico. PostgreSQL 10 High Performance: Expert techniques for query optimization, high availability, and efficient database maintenance. Packt Publishing Ltd, 2018.
4. GOLDBERG, Josh. Learning TypeScript. " O'Reilly Media, Inc.", 2022.

УДК 004.8:005.8

П.І. Сагайда[1], О.В. Мироненко[1]

[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ СТАНДАРТАМ СЕРТИФІКАЦІЇ З ЗАЛУЧЕННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Розроблено проєкт програмного комплексу, який забезпечує високу якість вхідних даних, уніфікує виконання процесів, значно скорочує трудомісткість підготовки до сертифікаційних аудитів та перетворює ISO підприємства на проактивний інструмент управління ризиками.

***Ключові слова**: штучний інтелект (ШІ), сертифікація ISO, управлінська діяльність, проактивний моніторинг, ризик-орієнтоване мислення, коефіцієнт готовності (R), верифікація, контекстна фільтрація, обробка природної мови (NLP), інформаційна підтримка*

Вступ. У сучасному глобалізованому середовищі відповідність стандартам ISO [1-4] є стратегічною необхідністю для забезпечення сталого розвитку, конкурентоспроможності та доступу до міжнародних ринків. Побудова системи

управління на вимогах ISO закладає міцний фундамент для ефективності та керованості бізнес-процесів.

Однак, поточна інформаційна підтримка управлінської діяльності на підприємствах часто характеризується критичною неефективністю:

1. Несистематизована постановка завдань з розмитими термінами.
2. Відсутність чіткої методології впровадження заходів.
3. Неорганізований та неструктурований формат звітності, що ускладнює аналіз та прийняття рішень.
4. Відсутність інструментів для оперативного контролю "план-факт" та підзвітності ISO в одній єдиній базі.

Ця неефективність створює прямий ризик втрати сертифікатів ISO під час наглядових аудитів, що може призвести до значних економічних збитків (втрата клієнтів, штрафи, додаткові витрати на відновлення).

Постановка задачі. Розробка та економічне обґрунтування програмного комплексу (ПК) для оптимізації інформаційної підтримки управлінської діяльності, що забезпечує відповідність стандартам сертифікації ISO із залученням Штучного інтелекту (ШІ). Базовим підходом є системний аналіз та ризик-орієнтоване мислення. Методологія управління процесами ґрунтується на стандартах ISO та циклі PDCA (Plan-Do-Check-Act), який використовується для структурування життєвого циклу завдань у ПК.

Для розробки модуля ШІ застосовано обробку природної мови (NLP) для аналізу тексту завдання/звіту та системи, засновані на правилах (Rule-based systems), для програмування логіки верифікації та генерації пропозицій методології.

Основний зміст роботи. Основний зміст роботи полягає у систематизації, проєктуванні та теоретичному обґрунтуванні архітектури інноваційного програмного комплексу, розробленого для проактивного забезпечення відповідності підприємства стандартам сертифікації ISO шляхом радикальної оптимізації інформаційної підтримки. Проведений аналіз довів, що неефективність управління є прямим джерелом економічного ризику втрати сертифікатів.

Розроблена модульна архітектура ПК, що базується на циклі PDCA (Plan-Do-Check-Act) та ризик-орієнтованому мисленні [5-6]. Це забезпечує наскрізний контроль якості управлінських рішень. Для кількісної оцінки ризиків розроблено модель багатокритеріальних зважених оцінок [7] для розрахунку коефіцієнта готовності до аудиту (R):

$$R = \sum_{i=1}^{N} Fi * Wi,$$

де Fi – оціночна функція за відповідними критеріями; Wi – ваговий коефіцієнт відповідної оціночної функції.

Проєктування забезпечує повну аудиторську готовність, модуль інтерактивного моніторингу з каскадною фільтрацією автоматично підтягує

фільтровану звітність для миттєвого документального підтвердження процесів. ПК мінімізує управлінські помилки та є інтелектуальним інструментом для постійного вдосконалення ISO.

Наукова новизна складається в удосконаленні моделі інформаційної підтримки та розробці трикомпонентної системи штучного інтелекту (ШІ), що забезпечує наскрізний інтелектуальний контроль якості управлінських рішень та проактивне гарантування відповідності стандартам сертифікації ISO [8].

Вперше в рамках даної системи управління якістю запропоновано та обґрунтовано функціональне розділення ШІ-модулів, які працюють на єдиній актуальній нормативній базі підприємства (якою керує адміністратор).

Інтеграція ШІ безпосередньо в процес постановки завдання для превентивного контролю та забезпечення обов'язкової формалізації (мінімальна кількість символів) поля "Методологія впровадження". Це усуває ризик "Недостатність інформації" на етапі планування.

Створено окремий консультаційний інструмент, який використовує каскадну логіку фільтрації (списки, що розкриваються) для обмеження джерела інформації одним, обраним документом. Цей механізм виключає надання неправильних чи суперечливих відповідей з інших джерел, забезпечуючи високу достовірність знань персоналу.

Розроблена та вдосконалена Модель Багатокритеріальних Зважених Оцінок для розрахунку Коефіцієнта Готовності до Аудиту (R). Новизна полягає у включенні в оціночну функцію (Fi) критеріїв, безпосередньо пов'язаних з активністю та якістю системи, забезпеченою використанням ШІ.

Організовано вплив на Fi через своєчасність реагування керівництва на ШІ-нагадування про відсутність критично важливих завдань та контроль якості виконання шляхом врахування Fi через виконання завдань з затвердженою методологією (забезпеченою ШІ-підтримкою виконавця [9-10]). Цей підхід дозволяє системі не лише фіксувати невідповідності, але й самокоригуватися, що гарантує високий та стабільний показник R.

Впровадження інтерактивного Модуля Моніторингу, який здійснює автоматичне підтягування аудиторської звітності (виконаних завдань) з Реєстру задач на основі каскадної фільтрації навігаційних шляхів забезпечує підвищення прозорості, уніфікує звітність та значно знижує трудомісткість підготовки до сертифікаційних аудитів, надаючи можливість миттєвого документального підтвердження для аудитора.

Розробка та використання модуля керування нормативною базою для адміністратора гарантує актуальність та достовірність усіх джерел інформації, які використовують інтелектуальні модулі.

Висновки. Доведено, що Програмний комплекс (ПК) є стратегічною інвестицією, яка запобігає економічним збиткам від втрати сертифікатів ISO, забезпечуючи стабільну конкурентоспроможність. Розроблений ПК мінімізує управлінські помилки, уніфікує процеси, скорочує час підготовки до аудиту та гарантує актуальність даних через Модуль керування нормативною базою.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : УкрНДНЦ, 2015. 16 с.
2. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 27 с.
3. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32 с.
4. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 48 с.
5. Крушеницька О. А. Управління якістю : навчальний посібник. Київ : ЦУЛ, 2017. 368 с.
6. Мельник О. Г., Ільчук П. Г. Теорія систем та системний аналіз : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. 376 с.
7. Петров А. П. Моделі багатокритеріальної оцінки ризиків невідповідності. *Управління розвитком складних систем.* 2022. № 49. С. 89–96.
8. Johnson, B. The Role of AI in ISO Compliance and Auditing. *ISO Journal*. 2024. URL: https://www.iso-journal.com/ai-compliance-auditing (дата звернення: 10.11.2025).
9. Ispas L, Mironeasa C, Severin T-L, Cerlincă D-A, Mironeasa S. Artificial Intelligence Applications in Risk Management Within Integrated Management Systems: A Review. *Systems*. 2025; 13(11):967. https://doi.org/10.3390/systems13110967.
10. Леонтьєв В. М. Застосування методів NLP для аналізу неструктурованих даних в системах підтримки прийняття рішень. *Вісник ХНУ.* Серія "Економіка". 2021. № 3. С. 45–52.

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], Д.Д. Сологуб[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ПРИ СТВОРЕННІ ВЕБСАЙТІВ

Анотація. У роботі розглянуто застосування технологій штучного інтелекту при створенні вебсайтів. Проаналізовано сучасні інструменти ШІ, зокрема GitHub Copilot, ChatGPT та генератори інтерфейсів, які допомагають автоматизувати кодування та дизайн. Також розглянуто ключові переваги використання ШІ.

Ключові слова: *штучний інтелект, веброзробка, генеративний ШІ, GitHub Copilot, ChatGPT, v0.dev, Midjourney.*

Вступ. Швидка інтеграція генеративного ШІ суттєво змінює індустрію розробки програмного забезпечення. Інструменти, які раніше були експериментальними, сьогодні вже активно використовуються багатьма розробниками. За даними відкритої статистики опитувань понад 60% фахівців використовують ШІ-асистентів у щоденній роботі. Це свідчить не лише про появу нової допоміжної технології, а й про серйозні зміни в підходах до написання та тестування коду. [1]

Сучасні інструменти ШІ спрощують роботу веброзробників, наприклад, автоматизують створення HTML-структур, CSS-стилів або прототипів

інтерфейсу. Це дозволяє зменшити час, витрачений на рутинну роботу, а також зосередитися на функціональності та UX. Крім того, ШІ може допомагати у забезпеченні кращої якості коду та виявленні потенційних помилок на ранніх етапах розробки. Він може автоматично генерувати код, пояснювати логіку, пропонувати варіанти виправлення помилок та оптимізації. Також, існують платформи тестування, які знаходять вразливості розробленого продукту та допомагають їх усувати.

Основний зміст роботи. В сучасних умовах ШІ можна інтегрувати у вебпроєкти протягом усіх етапів життєвого циклу розробки додатку. На етапі планування та дизайну ШІ може генерувати користувацькі сценарії та прототипи за допомогою таких інструментів, як v0.dev (рис. 1) сервіс від Vercel, що створює повноцінні вебінтерфейси на основі коротких текстових описів, автоматично генеруючи HTML, CSS і React-компоненти, що значно скорочує час підготовки дизайну. [2]

Корисним також є сервіс Uizard (рис. 2), який дозволяє перетворювати звичайні ескізи або текстові інструкції у інтерактивні прототипи, забезпечуючи швидкий перехід від ідеї до готового макета без участі професійного дизайнера.

Окрім цього, популярними є Figma AI (рис. 3) – модуль, що допомагає дизайнерам автоматично формувати макети інтерфейсу, оптимізувати композицію та кольорову гаму, а також Framer AI (рис. 4), який здатен створювати готові адаптивні вебсторінки лише за текстовим описом. Такі інструменти дають змогу прискорити процес створення вебресурсів, зменшити кількість ручної роботи та покращити узгодженість між дизайном і розробкою.

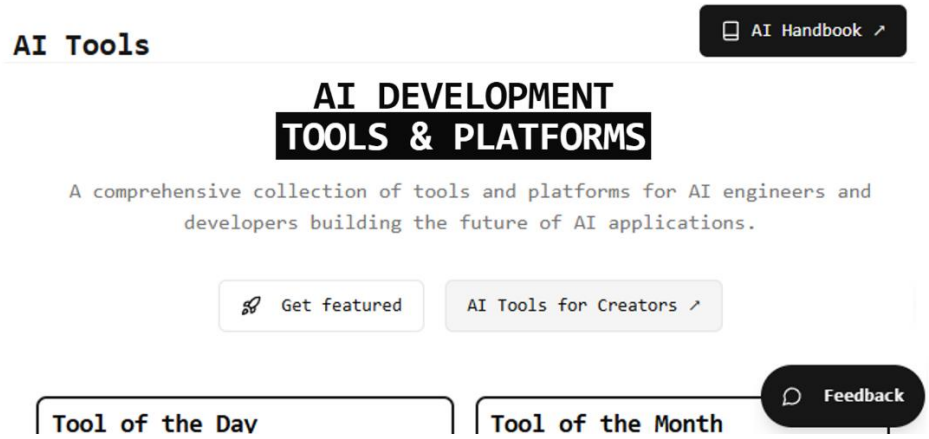


Рис. 1. Приклад сторінки, згенерованої за допомогою v0.dev

ШІ сприяє розробці HTML, CSS та JavaScript, дозволяє працювати з фреймворками та швидко знаходити помилки, а також допомагає покращити структуру й оптимізацію коду. У процесі програмування активно застосовується Tabnine – це інструмент на основі штучного інтелекту, призначений для покращення процесу розробки програмного забезпечення. Він аналізує стиль

написання коду конкретного розробника і пропонує інтелектуальні підказки та автодоповнення, прискорюючи розробку.

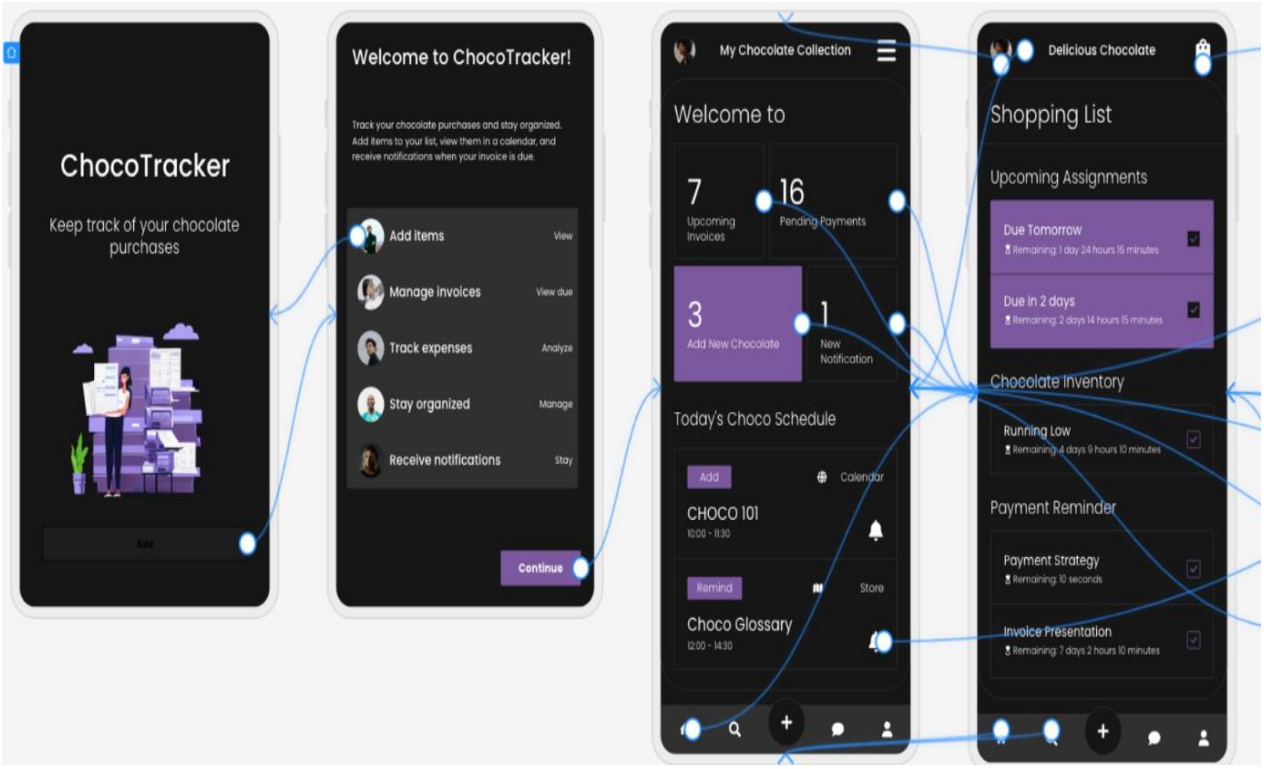


Рис.2. Дизайн-макет, створений сервісом Uizard.

Рис. 3. Приклад сторінки, створеної за допомогою Figma AI [4].

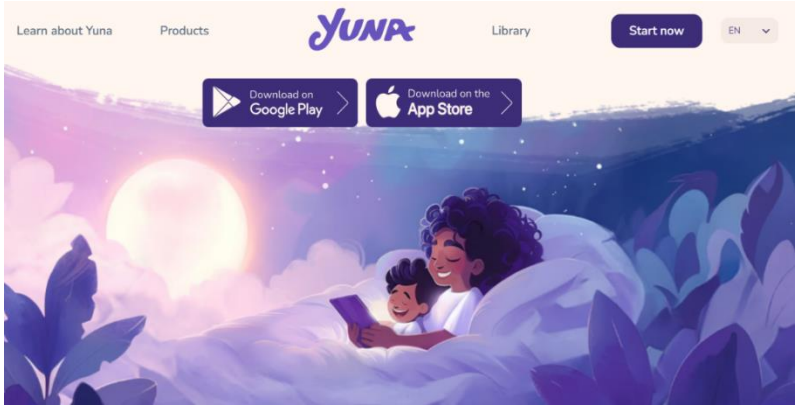


Рис.4. Приклад сторінки, створеної за допомогою Framer AI [5].

Створення одного компонента, наприклад інтерактивної форми реєстрації з перевіркою даних у реальному часі, можна виконати трьома способами: написати код вручну, використати готовий фреймворк або згенерувати за допомогою ШІ. Застосування ШІ прискорює процес розробки, полегшує адаптацію компонентів до різних пристроїв та дає змогу розробникам зосередитися на покращенні UX. Тестування та супровід із використанням ШІ дозволяють виявляти помилки, аналізувати продуктивність додатків і сприяють подальшій оптимізації та вдосконаленню коду.

Висновки. ШІ-інструменти вже довели свою ефективність, прискорюючи рутинні операції та спрощуючи створення коду, дизайну й контенту, при цьому не замінюючи базові знання з вебтехнологій. Генерація компонентів за допомогою ШІ є найшвидшою, проте потребує перевірки досвідченим розробником для забезпечення якості та безпеки фінального продукту. Важливо пам’ятати, що традиційні методи залишаються необхідними для контролю якості та забезпечення безпеки коду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. AI development tools & platforms [електронний ресурс]. URL: https://ai.exemplar.dev/ (дата звернення: 09.11.2025).
2. The state of AI in 2025: Agents, innovation, and transformation [електронний ресурс]. URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai (дата звернення: 09.11.2025).
3. 5 AI generated UI designs that will blow your mind [електронний ресурс]. URL: https://uizard.io/blog/5-ai-generated-ui-designs/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.11.2025).
4. QUANTUM_PORTAL [електронний ресурс]. URL: https://humid-team-14068564.figma.site/ (дата звернення: 09.11.2025).
5. Personalized and interactive children's stories powered by AI [електронний ресурс]. URL: https://www.framer.com/gallery/yunastoriescom?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.11.2025).

УДК 004.8:37.018.4

П.І. Сагайда[1], Я.А. Плуталов[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ВИКОРИСТАННЯ AI-АГЕНТІВ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Анотація. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до побудови мультиагентних AI-систем в освітньому середовищі, архітектурних й алгоритмічні рішення для реалізації групової взаємодії агентів та їхнього співпрацювання з реальним студентом. На прикладі проєкту, де працюють двоє агентів-студентів (для створення соціальної та педагогічної атмосфери) і один агент-вчитель (пояснення матеріалу реальному студенту), обґрунтовано вибір методів декомпозиції задач, механізмів пам'яті й рефлексії, а також протоколів взаємодії між агентами та людиною.

Ключові слова: *AI-агенти, мультиагентні системи, педагогічні агенти, LLM, інтелектуальне освітнє середовище, групове навчання, RAG.*

Вступ. Розвиток великих мовних моделей (LLM) та архітектур мультиагентних систем започаткував нові парадигми для освіти, які моделюють групову взаємодію і соціальні ролі в навчанні. Різні підходи до проєктування агентів (модулі контролю, логіки, пам'яті та зовнішніх інтерфейсів) дають змогу комбінувати адаптивне навчання з підтримкою мотивації та емоційного залучення студентів. Останні праці пропонують формальні рамки побудови таких систем і демонструють емпіричні результати в реальних курсах [1,3].

Постановка задачі. Мета дослідження – розробити та дослідити методи й алгоритми, що забезпечують ефективну роботу локального освітнього мультиагентного середовища, яке містить: агента-вчителя з функціями пояснення матеріалу й адаптивних відповідей; двох агентів-студентів, що імітують соціальну взаємодію, створюють атмосферу групової роботи та стимулюють реального студента до участі. Завдання включають: формалізацію ролей агентів, розробку протоколів міжагентної комунікації, механізмів спільної рефлексії і механізмів управління пам'яттю, а також верифікацію впливу таких агентів на увагу, мотивацію й академічні результати студентів. Подібні архітектури описано у сучасних роботах про von Neumann MAS для освіти та дослідженнях LLM-самоорганізації [1,4].

Методологія та використовувані алгоритми. Архітектурна модель агентів. Кожен агент реалізується як модульна сутність із контролером діалогу, логічним шаром для педагогічних рішень, модулем пам'яті та інтерфейсом інструментів. Така структура узгоджена з підходом «чотрьох модулів» у сучасних MAS-фреймворках [1].

LLM як ядро поведінки. Агент-вчитель і агенти-студенти використовують тонко налаштовані LLM для генерації пояснень, запитань і реакцій; додатково

застосовують RAG (retrieval-augmented generation) для підключення доменної бази знань і курс-матеріалів. Рекомендовано розділяти “сприйняття вхідної інформації” та “планування” через зовнішні інструменти (retrieval, calculator, code execution) [1,2,5].

Міжагентна координація. Використовується протокол ролей: вчитель - фасилітатор, студенти-агенти - колаборативні партнери/мотиватори. Синхронні сценарії (живе заняття) керуються через lightweight message bus; асинхронні – через черги подій і спільну пам’ять (knowledge graph / vector DB). Подібні робочі процеси описано у систематичних оглядах LLM-MAS [3].

Рефлексія та адаптація. Застосовується цикл «дія - рефлексія - оновлення пам’яті», де агенти роблять самооцінювання (chain-of-thought + outcome logging) і коригують підходи до пояснень або стилю взаємодії. Цей підхід сприяє підвищенню когнітивної якості пояснень та внутрішнього узгодження поведінки агентів [4].

Узагальнена архітектура розробленої платформи наведено на рис. 1.

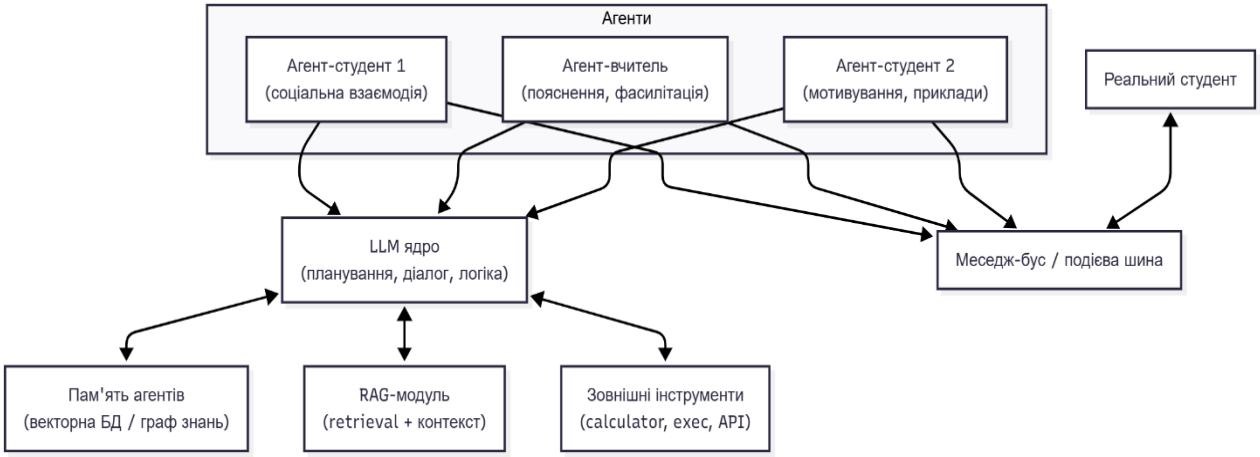


Рис. 1. Узагальнена архітектура розробленої платформи

Очікувані результати від впровадження:

- Покращення залученості студентів завдяки соціальним сигналам від агентів-студентів (збільшення часу взаємодії та кількості запитань).
- Зменшення когнітивного навантаження під час опанування нових тем при коректно налаштованому агенті-вчителі (попередні огляди показують помірний вплив педагогічних агентів на когнітивне навантаження [4]).
- Технічна стійкість архітектури: архітектура modular LLM + retrieval + memory дозволяє масштабувати сценарії від одного курсу до цілого освітнього модуля [4].

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

1. Поєднання невеликого “соціального шару” (двоє агентів-студентів) із повнофункціональним агентом-вчителем для відтворення групової динаміки у синхронних сесіях.

2. Інтеграція циклу внутрішньої еволюції агентів зі зворотним зв'язком від реальних студентів – підхід, що підсилює "колективний інтелект" агентів і їхню педагогічну корисність.

3. Практичне застосування гібридних протоколів (RAG + multi-agent coordination [5]) для адаптивного пояснення і мотиваційної взаємодії.

Висновки. Реалізація мультиагентного освітнього середовища з ролями «вчитель - студенти - реальний студент» є перспективним напрямом, що поєднує переваги LLM-технологій, архітектур MAS та педагогічних практик. Подальші кроки: емпіричне дослідження впливу таких систем у навчальних експериментах, тонке налаштування персон і системних промптів агентів, а також розробка етичних і приватнісних політик для захисту студентських даних. Сучасні літературні джерела підкреслюють необхідність систематичного підходу до дизайну й оцінки педагогічних агентів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Jiang Y.-H., Li R., Zhou Y., Qi C., Hu H., Wei Y., Jiang B., Wu Y. AI Agent for Education: von Neumann Multi-Agent System Framework. *arXiv.org e-Print archive*. URL: https://arxiv.org/html/2501.00083v1
2. Hao Z. Student-AI Interaction in an LLM-Empowered Learning Environment. *arXiv.org e-Print archive*. URL: https://arxiv.org/html/2503.01694v3
3. Li X., Wang S., Zeng S., Wu Y., Yang Y. A Survey on LLM-based Multi-Agent Systems: workflow, infrastructure and challenges. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s44336-024-00009-2
4. Chu Z., Wang Sh., Xie J., Zhu T., Yan Y., Ye J., Zhong A., Hu X., Liang J., Yu S. Ph., Wen Q. LLM Agents for Education: Advances and Applications. URL: https://arxiv.org/html/2503.11733v1
5. Aquino G. A., Azevedo N., Okimoto L., Camelo L., Bragnaca H., Fernandes R, Printes A., Cardoso F., Claudio R., Torne I. From RAG to Multi-Agent Systems: A Survey of Modern Retrieval and MAS Techniques. URL: https://www.researchgate.net/publication/388773274_From_RAG_to_Multi-Agent_Systems_A_Survey_of_Modern_Approaches_in_LLM_Development

УДК 004.415.3:681.6

С.К. Добряк[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ГРАФІЧНОГО АДАПТЕРУ З ВИКОРИСТАННЯМ FPGA

Анотація. Описано процес створення навчальної апаратної реалізації стандарту OpenGL на FPGA для покращення засвоєння принципів побудови апаратно-програмних графічних систем. Завдяки модульній архітектурі та використанню Verilog студенти можуть поетапно опановувати трансформації, растеризацію та керування графічним конвеєром, що забезпечує глибше розуміння взаємодії між програмним API та апаратною реалізацією.

***Ключові слова**: FPGA, Verilog, OpenGL, графічний конвеєр, растеризація, фіксований функціональний конвеєр, апаратна графіка, цифрове проєктування, комп'ютерна графіка, апаратно-програмні комплекси.*

Вступ. Реалізація графічних конвеєрів у апаратурі залишається однією з ключових тем у галузі комп'ютерної графіки, цифрового проєктування та побудови вбудованих систем. Сучасні графічні процесори являють собою складні багатокаскадні апаратні пристрої, функціонування яких базується на стандартизованих API, серед яких одним з найпоширенішим є OpenGL. Незважаючи на широке використання OpenGL у програмуванні, його апаратна сторона залишається менш доступною для студентів та початківців у мікроелектроніці.

Використання програмованих логічних інтегральних схем (FPGA) відкриває можливість вивчення та практичного опанування принципів роботи графічного конвеєра на апаратному рівні. Базовий стандарт OpenGL 1.x [1] є оптимальним навчальним інструментом завдяки фіксованому функціональному конвеєру, відсутності програмованих шейдерів і чіткій структурі операцій над примітивами. Його апаратна реалізація дозволяє побудувати модель GPU, зрозумілу для дослідження та модифікації.

У представленій роботі описано підхід до створення апаратної реалізації основних можливостей OpenGL 1.x на FPGA, орієнтованої на навчальний процес. Для розробки апаратної частини використано мову опису апаратури Verilog, що є стандартним засобом цифрового проєктування [2].

Робота демонструє можливість поступового розширення функціональності – від підтримки точок і ліній до більш повної реалізації графічного конвеєра OpenGL.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- ознайомитися з принципами роботи графічних стандартів на апаратному рівні;

- вивчити структуру та функціональність фіксованого графічного конвеєра OpenGL 1.x;
- реалізувати мінімальний набір команд і операцій OpenGL у вигляді апаратних модулів на FPGA;
- отримати практичний досвід програмування мовою Verilog та інтеграції апаратної частини з програмним API.

Основний зміст роботи. Під час роботи над даною роботою булі використані наступні методи та інструменти.

- мова опису апаратних пристроїв Verilog;
- середовище розробки Quartus Prime фірми Altera;
- мова програмування C, мова програмування Python.

Ключові елементи, що визначають підхід до побудови апаратно-програмного графічного комплексу є: використання стандарту OpenGL 1.x [1] із фіксованим конвеєром, застосування FPGA [2] та мови опису апаратури Verilog, а також поетапний перехід від програмної реалізації окремих блоків до їх інтеграції в апаратну структуру. Такі обмеження дозволяють сформувати чітку методику аналізу та поєднання програмних і апаратних компонентів, орієнтовану на навчальні потреби та підвищення ефективності засвоєння матеріалу студентами. Обрана методика дає змогу вбудовувати концепції апаратної графіки у навчальний процес поступово, від простих моделей до структур, які реалізують усе більше елементів реального графічного конвеєра [7].

Стандарт OpenGL 1.x [1] є цінним для навчання завдяки чітко структурованій послідовності обробки даних: трансформація вершин, освітлення, растризація, обробка фрагментів та формування кінцевого зображення. У межах цієї моделі студенти можуть ознайомитися з логікою графічного рендерингу без необхідності вивчати шейдерні мови, що властиво новішим стандартам. Структура фіксованого конвеєра дозволяє виділити такі основні блоки: модельні та оглядові трансформації, проєкційні перетворення, операції з нормалями та освітленням, полігональна обробка, растризація та механізми тестування глибини [7]. Кожен із цих блоків виконує суворо визначену функцію, що забезпечує можливість їх прямої апаратної реалізації на FPGA.

Апаратні ресурси FPGA відкривають широкі можливості для реалізації окремих компонентів графічного конвеєра, зокрема обчислювальних блоків для трансформацій, модулів растризації та частини фрагментних операцій [3]. На відміну від класичних GPU, FPGA дозволяє створювати структуру, що максимально відповідає потребам навчального експерименту, включно з модифікацією логіки виконання, зміною формату передавання даних та інтеграцією користувацьких апаратних модулів. Значною перевагою є паралельність, яку можна реалізувати на рівні логічних елементів, створюючи кілька незалежних модулів обробки та масштабуючи систему пропорційно до складності графічного завдання [4]. Це дозволяє студентам експериментувати з

різними топологіями конвеєра, оцінювати вплив часових затримок, об'єму буферизації та черговості операцій на підсумкову продуктивність системи.

Реалізація мінімальної частини графічного ядра на FPGA передбачає старт із простого модуля -- наприклад, блоку перетворення координат або растризатора для примітивних геометричних фігур. Такий підхід відповідає педагогічним цілям, оскільки дозволяє студентам зрозуміти принципи апаратної обробки даних без необхідності одразу працювати з великими обсягами логіки. Після впровадження першого апаратного модуля реалізація розширюється за рахунок поступового додавання нових блоків. Програмні реалізації відповідних етапів OpenGL 1.x слугують як еталон і референс для порівняння, що допомагає студентам оцінити відмінності між апаратною та програмною моделями. Зокрема, програмний модуль освітлення або трансформацій може бути замінений апаратним блоком, коли студенти оволодіють основами Verilog, моделюванням часових діаграм та оптимізацією логічних елементів.

Особливе значення для навчального процесу має можливість послідовної заміни програмних компонентів на апаратні. Такий підхід сприяє формуванню системного мислення: студент спочатку знайомиться з блоками графічного конвеєра на рівні програмних бібліотек OpenGL, а потім аналізує їх детальну структуру та втілює її у вигляді логічних схем на FPGA. Внаслідок цього формується подвійний рівень розуміння -- як алгоритмічний, так і схемотехнічний. Це дозволяє у подальшому більш усвідомлено перейти до вивчення сучасних графічних стандартів, зокрема програмованих конвеєрів.

Застосування FPGA у межах вивчення графічного конвеєра дає змогу демонструвати низку важливих концепцій: апаратний паралелізм, роботу з фіксованою комою, оптимізацію логічних шляхів, побудову конвеєрних структур, тестування часових параметрів, а також апаратну обробку буферів. Усе це є ключовими складниками компетентностей для інженерів, що працюють у галузі цифрової обробки сигналів та графічних систем. Навчальна методика, що поєднує програмний рівень OpenGL 1.x і поступову апаратну реалізацію, сприяє підвищенню зацікавленості студентів, оскільки дає змогу відчути безпосередній зв'язок між теоретичними моделями та реальними апаратними реалізаціями.

Огляд можливостей FPGA демонструє, що найперспективнішими блоками для реалізації є модулі геометричних трансформацій, оскільки їхня структура має чітко визначений набір операцій, які легко відобразити на апаратні ресурси. Блоки растризації, хоча і складніші, можуть бути реалізовані в спрощеній формі для трикутних або лінійних примітивів [5], що дозволяє поступово вводити студентів у процес формування фрагментів. Обробка фрагментів, навпаки, є значно складнішою через численні операції, пов'язані з освітленням, текстуруванням та обчисленням кольору. Проте навіть часткове переміщення певних функцій на FPGA може бути корисним з погляду навчальної методики.

Запропонована система апаратно-програмної інтеграції OpenGL 1.x із FPGA сприяє підвищенню залученості студентів, оскільки дозволяє застосовувати набуті знання у практичних експериментах. Студенти мають

можливість бачити прямі результати своєї роботи, порівнювати апаратну та програмну реалізації, експериментувати з оптимізацією окремих блоків [6]. Це створює умови для глибшого розуміння принципів побудови графічних систем і формує фундамент для подальшого навчання складнішим темам, зокрема програмованим конвеєрам та сучасним GPU-архітектурам.

Наукова новизна роботи полягає у створенні навчальної FPGA-платформи, де програмні виклики OpenGL 1.x безпосередньо відповідають апаратній реалізації графічного конвеєра. Запропонований модульний підхід дозволяє поступово розширювати функціональність та ефективно вивчати апаратні основи комп'ютерної графіки.

Висновки. В результаті було спроектовано і створено навчальну FPGA-платформу, що реалізує базову підмножину OpenGL 1.x та демонструє принципи роботи фіксованого графічного конвеєра засобами Verilog. Запропонований підхід забезпечує відповідність між програмними командами та апаратним виконанням, дає можливість поетапного розширення функціональності та є ефективним інструментом для вивчення цифрового проєктування й апаратних основ комп'ютерної графіки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. OpenGL Architecture Review Board. OpenGL 1.1 Specification. Silicon Graphics Inc., 1997.
2. Brown S., Vranesic Z. Fundamentals of Digital Logic with Verilog Design. McGraw-Hill, 2013.
3. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. Real-Time Rendering. CRC Press, 2018.
4. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically Based Rendering. Morgan Kaufmann, 2016.
5. Bresenham J. E. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal.* 1965. Vol. 4, Issue 1, P. 25–30. DOI : https://doi.org/10.1147/sj.41.0025.
6. Woods R., McAllister J., Lightbody G., Yi Y. FPGA-Based Implementation of Signal Processing Systems. Wiley, 2017.
7. Hearn D., Baker M. Computer Graphics with OpenGL. Prentice Hall, 2003.

УДК: 621.735

К.Д. Колісник[1], В.Л. Чухліб[1]
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗГИНАННЯ ГАКІВ ВЕЛИКОЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ

Анотація. У роботі представлено результати чисельного моделювання впливу температурних режимів нагріву заготовок під час процесу згинання гаків великої вантажопідйомності. Досліджено, як температура початкового нагріву (950 °C, 1050 °C, 1150 °C, 1250 °C) впливає на напружено-деформований стан металу, розподіл пластичної деформації та можливе утворення дефектів у зоні хвостовика гака.

***Ключові слова**: згинання, кування гаків, температурні режими, пластична деформація, моделювання QForm, НДС, якість поковки.*

Вступ. При виготовленні гаків великої вантажопідйомності застосовуються значні деформації, особливо у зоні внутрішнього радіуса згину. Одним з визначальних чинників, що впливають на рівномірність пластичної деформації, є температурний режим нагріву заготовки. Недостатній нагрів призводить до підвищених напружень, утворення тріщин, збільшує нерівномірність деформації; надмірний нагрів — до зниження міцності металу, росту зерна та окалини. Тому важливим завданням є встановлення раціонального температурного інтервалу, який забезпечує найсприятливіший розподіл НДС під час згинання [1,2].

Постановка задачі. Метою роботи є визначення оптимального температурного режиму нагріву заготовки для забезпечення рівномірного деформування під час згинання гаків. Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- змоделювати процес згинання при температурах 950 °C, 1050 °C, 1150 °C, 1250°C у QForm;
- визначити, як температура впливає на інтенсивність напружень у зоні хвостовика;
- провести порівняльний аналіз пластичної деформації для різних температур;
- встановити температурний режим, що мінімізує ризик утворення дефектів та перевантажень металу.

Основний зміст роботи. Під час роботи для чисельного моделювання було застосовано метод кінцевих елементів (МКЕ). Моделювання операції згинання гака (див. рис. 1) виконувалося у програмному комплексі QForm UK [3] для дослідження впливу температурних режимів 950–1250 °C (як найбільш

поширений діапазон обробки сталі 20, 20Г та аналогів) на напружено-деформований стан металу в критичних зонах гака, що є ключовим фактором для прогнозування дефектів та перевантажень металу .

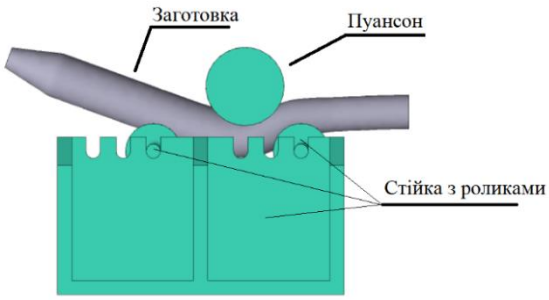


Рис. 1. 3D-модель процесу згинання гака

У ході моделювання встановлено, що зміна температурного режиму суттєво впливає на характер напружено-деформованого стану при згинанні гака. Для нижчих температур характерне підвищення жорсткості матеріалу та збільшення пікових напружень, тоді як за вищих температур помітно, що деякі ділянки деформуються надто сильно, і метал починає зміщуватися у небажаному напрямку. Однак однозначного визначення раціонального температурного діапазону на даному етапі дослідження не виконано — аналіз триває.

Наукова новизна. У роботі вперше проведено порівняльний аналіз впливу різних температур нагріву на напружено-деформований стан заготовки при згинанні гаків великої вантажопідйомності за допомогою програмного моделювання. Отримано нові дані щодо формування деформацій залежно від температури, що дозволяє визначити підходи для покращення технологічних параметрів згинання.

Висновки. Температура нагріву заготовки істотно впливає на характер напружено-деформованого стану металу при згинанні. За нижчих температур збільшуються пікові напруження, за вищих — поява тенденцій до надмірного зміщення металу у небажаному напрямку. Отримані проміжні результати дозволяють окреслити ключові температурні інтервали для подальшого аналізу, однак остаточні рекомендації щодо раціонального режиму потребують додаткових досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Rihacek J., Bartak J., Podany K., Kubina T. Numerical Analysis and Optimization of the Hook Forging Process. *MM Science Journal*. 2021. June. P. 4407–4412. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_6_2021022
2. Onur Y. A., Özdemir A. Theoretical and experimental investigation of stress distribution in a crane hook. *Materials Testing*. 2019. Vol. 61, No. 10. P. 1003–1009. DOI: https://doi.org/10.3139/120.111357
3. QForm UK. URL: https://www.qform3d.com/ (accessed January 21, 2025).

УДК 004.89:378.1

В.В. Ровенська[1], П.І. Сагайда[1], Н.Ю. Рекова[1], О.С. Касьянюк[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

РОЗРОБКА ТА ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ EDUFLOW BI ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» В КОНТЕКСТІ УКРАЇНСЬКИХ ПРАКТИК ОСВІТНЬОЇ АНАЛІТИКИ

Анотація. У роботі представлено інтегровану платформу EduFlow BI Технічного університету «Метінвест Політехніка», спрямовану на наскрізну аналітику освітніх даних. Описано архітектуру системи, ключові функціональні можливості, застосування штучного інтелекту та проведено порівняння з українськими практиками освітньої аналітики. Показано унікальні переваги платформи щодо глибини інтеграції, достовірності даних та впроваджених AI-моделей.

Ключові слова: *освітня аналітика, Learning Analytics, EduFlow BI, штучний інтелект, прогнозування відтоку, рекомендаційні системи, Power BI, Moodle.*

Вступ. Цифровізація вищої освіти вимагає переходу від описової статистики до прогностичної та рекомендаційної аналітики. Для українських ЗВО критично важливо створювати системи, що інтегрують адміністративні та поведінкові дані, забезпечують достовірність та підтримують управлінські рішення [1,2]. EduFlow BI розроблена як університетська платформа наскрізної аналітики, що відповідає сучасним міжнародним тенденціям [3-6].

Постановка задачі. Метою роботи є стислий аналіз архітектури, функціоналу та AI-модулів платформи EduFlow BI, а також визначення її місця серед українських рішень освітньої аналітики [1,7,8]. Основні задачі: окреслити структуру та підсистеми EduFlow BI; показати можливості застосування ШІ; провести коротке порівняння з практиками інших ЗВО; виділити інноваційний потенціал платформи.

Основний зміст роботи

1. Архітектура EduFlow BI. Розроблена та впроваджена в університеті платформа базується на трикомпонентній моделі:

- Облікова система – джерело адміністративних та академічних даних (структура університету, кадри, навчальні плани, контингент, успішність).
- LMS Moodle – поведінкові та поточні навчальні дані студентів.
- Аналітичний модуль Power BI – консолідація, візуалізація та управлінська аналітика.

У підсистемі «Успішність» реалізовано повний цикл фіксації, валідації та юридичного підтвердження оцінок за допомогою КЕП, що забезпечує достовірність даних для формування офіційних документів. Загальну схему трикомпонентної архітектури платформи EduFlow BI представлено на рис. 1.

2. Аналітична звітність Power BI. Платформа формує інтерактивні дашборди: контроль нульової активності, академічних боргів, індивідуальних

планів, рейтингів, статистики контингенту та успішності. Це дозволяє оперативно реагувати на академічні ризики та планувати розвиток освітніх програм.

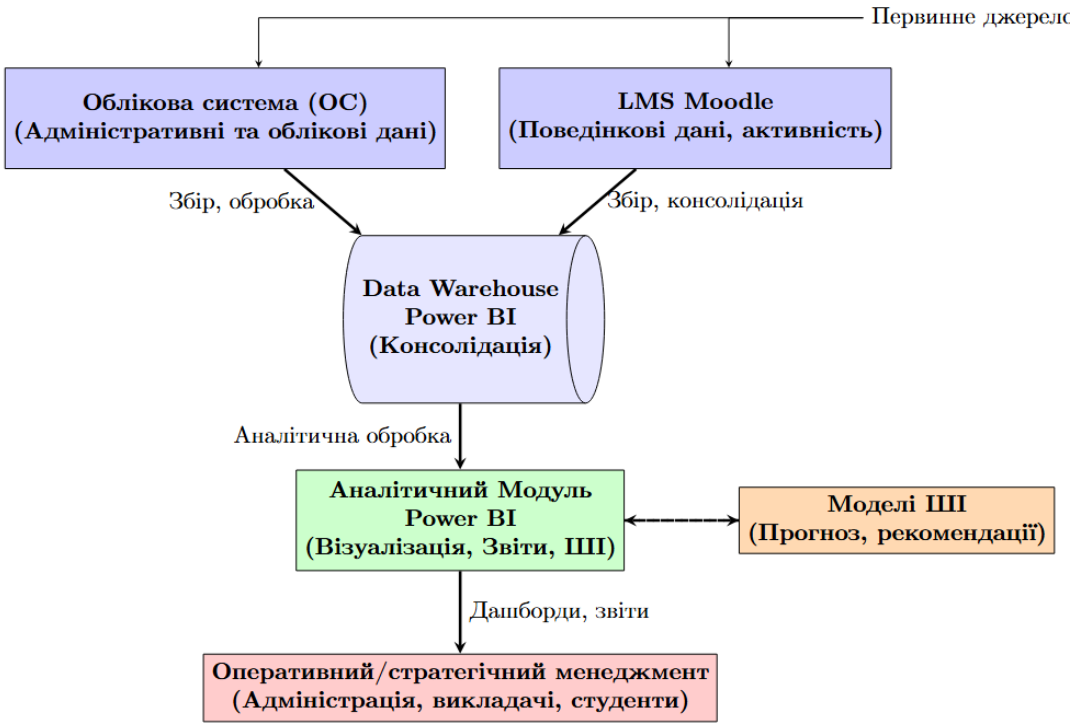


Рис. 1. Трикомпонентна архітектура платформи EduFlow BI.

3. Використання ШІ. У EduFlow BI використовується:

- модель прогнозування відтоку студентів (градієнтний бустинг, точність 82–92%), що дозволяє завчасно ідентифікувати групи ризику;
- рекомендаційну систему вибору дисциплін, створену на основі колаборативної фільтрації, яка забезпечує персоналізацію освітніх траєкторій;
- кластеризацію студентів і викладачів для виявлення навчальних патернів і підтримки педагогічних рішень.

4. Порівняння з деякими українськими практиками розробки та впровадження комплексного e-learning середовища:

- НУБіП та КУ ім. Б. Грінченка – фокус системи, яка розроблена та застосовується: Moodle-центрична аналітика, фокус на активності та якості онлайн-курсів [1].
- СумДУ – комплексне e-learning середовище, орієнтоване на майбутнє впровадження ШІ [7].

За результатами порівняльного аналізу розглянутих сучасних кейсів та EduFlow BI, визначено, що дана розробка вирізняється:

- наскрізною інтеграцією адміністративних і поведінкових даних;
- гарантованою юридичною достовірністю записів;
- вже реалізованими AI-моделями.

Наукова новизна розробки та дослідження полягає в наступному:

- Обґрунтовано та реалізовано трикомпонентну архітектуру, яка поєднує облікові й поведінкові дані в єдиному аналітичному просторі.
- Представлено діючі прогностичні та рекомендаційні AI-моделі, інтегровані у щоденне управління університетом.
- Запропоновано підхід до кластеризації студентів і викладачів для виявлення прихованих закономірностей навчання.

Висновки. EduFlow BI є високорівневою платформою освітньої аналітики, що забезпечує: повну інтеграцію даних від обліку до аналітики; юридично підтверджену достовірність академічних записів; практичне застосування ШІ для прогнозування ризиків і персоналізації навчання; конкурентні переваги відносно інших українських практик за рівнем системності й функціональності. Платформа формує основу для переходу університету до AI-driven управління якістю освіти та ефективного розвитку академічного середовища.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Глазунова О. Г., Клименко Є. О., Волошина Т. В., Мокрієв М. В., Вороненко О. В. Освітня аналітика в університетах: інструменти для аналізу та прогнозування. *Телекомунікаційні та інформаційні технології.* 2024. № 2 (83). С. 49–59. DOI : 10.31673/2412-4338.2024.026171.
2. Romero C., Ventura S. Educational Data Mining: a Review of the State of the Art. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews).* 2010. Vol. 40, No. 6. P. 601–618.
3. Hoti A. H., Zenuni X., Ajdari J., Ismaili F. Predictive Modeling of Student Success Using Machine Learning. *International Journal on Information Technologies & Security.* 2025. Vol. 17, No. 1, P. 37–46.
4. Vaarma M., Li H. Predicting student dropouts with machine learning: An empirical study in Finnish higher education. *Technology in Society*. 2024. Volume 76. DOI : https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102474
5. Matz S.C., Bukow C.S., Peters H., Deacons C., Dinu A., Stachl C.. Using machine learning to predict student retention from socio-demographic characteristics and app-based engagement metrics. *Sci. Rep.* 2023. Vol. 13. P. 5705. DOI : https://doi.org/10.1038/s41598-023-32484-w
6. Nguyen K. L., Mayberry T. R., Liu Y., Khine M. S., Pallipuram V. K. An Evaluation of Tiered Machine Learning Framework to Predict Science Achievement Among Singapore Students. *International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 2023. P. 200–206.
7. Навчальні ресурси СумДУ. University online learning ecosystem. URL : https://elearning.sumdu.edu.ua/
8. Kuchyn Yu. L., Naumenko O.M., Vlasenko O.M., Lytvynova S.H., Burov O. Yu., Kucherenko I.I., Mykytenko P.V. The experience of designing a single information and educational environment of the university “NMU Digital”. *Educational Technology Quarterly*. 2022. Vol. 1. P. 73-87. DOI : https://doi.org/10.55056/etq.10

УДК 004.422

А.В. Кожевников[1], О.В. Сосенюк[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ІСТОРІЇ ЗМІН ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Анотація. Запропоновано концептуальну модель аналізу змін програмного забезпечення, яка забезпечить комплексне виявлення та аналіз еволюції зв'язків між файлами вхідного коду. Модель поєднує обробку історії комітів, обчислення мір подібності, кластеризацію співзмін і порівняння кластерів у часі, що створить основу для глибшого розуміння структурної еволюції програмних систем і розроблення інструментів підтримки рефакторингу та супроводу. Розглянуто математичний апарат формування вхідних даних для аналізу історії змін.

***Ключові слова**: репозиторій, коміт, еволюція програмного забезпечення, історія змін програмного забезпечення, системи керування версіями.*

Актуальність проблеми. Еволюція програмного забезпечення (ПЗ) є безперервним процесом змін, що триває протягом усього життєвого циклу програмного продукту. Вона передбачає поступове вдосконалення, оновлення та адаптацію системи до вимог користувачів і зовнішнього середовища з метою підтримки або поліпшення якості ПЗ, зокрема таких його характеристик, як коректність, узгодженість, зручність використання та легкість супроводу [1].

Неминучість змін у програмному забезпеченні зумовлена потребою постійного оновлення та адаптації систем до нових умов . Еволюційні процеси сприяють розширенню функціональності, виправленню помилок і підвищенню ефективності програм, забезпечуючи їх життєздатність [2]. Закони Лемана [3] підтверджують неминучість змін і появу нових залежностей між програмними компонентами. Такі зміни є природною реакцією на динаміку середовища та вимоги користувачів, що робить еволюцію одним із фундаментальних чинників сучасної інженерії програмних систем.

В той же час еволюція ПЗ супроводжується зростанням складності та поступовою втратою архітектурної узгодженості або архітектурною деградацією [4, 5]. Щоб запобігти деградації, необхідно постійно відстежувати стан архітектури, аналізувати ознаки її погіршення, усувати причини накопичення боргу та регулярно проводити рефакторинг. Системне управління еволюцією допомагає підтримувати баланс між розвитком функціональності, стабільністю структури та якістю програмного забезпечення [6]. Це підкреслює важливість системного вивчення історії змін ПЗ, як завдання програмної інженерії, метою якого є підтримка архітектурної цілісності ПЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним джерелом даних для таких досліджень історії змін ПЗ є системи керування версіями, які зберігають детальну історію комітів. Під комітом мається на увазі запис змін до файлів

проєкту, який створює "знімок" стану репозиторію на певний момент часу [7]. Кожен коміт містить унікальний ідентифікатор, інформацію про автора та час створення, а також коментар, що описує внесені зміни. Проте реальні репозиторії містять значну кількість шуму, дублювань і неструктурованих даних, тому попередня обробка є критичною для забезпечення достовірності результатів.

Сучасні технології досліджень історії змін ПЗ зосереджуються на трьох основних напрямах: MSR (Mining Software Repositories) [8, 9], Co-change Analysis [10], та Architecture Recovery [4, 5, 8]. MSR використовує методи статистики, графового аналізу та машинного навчання для добування знань із репозиторіїв. Co-change Analysis дає змогу виявляти логічні зв'язки між файлами, що часто змінюються разом, і визначати приховані залежності та потенційні ризики супроводу. Напрям Architecture Recovery спирається на результати аналізу співзмін і застосовує кластеризацію артефактів для відновлення архітектурної структури та виявлення ознак її деградації.

Попри значний прогрес, існуючі підходи мають низку обмежень. Більшість із них не враховує динаміку змін у часі, аналізує лише окремі версії системи або працює на рівні модулів, ігноруючи зв'язки між файлами. Додаткові труднощі спричиняє неоднозначність трактування співзмін у складних комітах і відсутність уніфікованих критеріїв для порівняння кластерів у різних часових інтервалах.

Мета дослідження. Полягає в розробці концептуальної моделі аналізу змін ПЗ, яка забезпечить комплексне виявлення та аналіз еволюції зв'язків між файлами вхідного коду. Модель має поєднувати обробку історії комітів, обчислення мір подібності, кластеризацію співзмін і порівняння кластерів у часі, що створить основу для глибшого розуміння структурної еволюції програмних систем і розроблення інструментів підтримки рефакторингу та супроводу.

Основний зміст роботи. Концептуальна модель аналізу історії змін задає формальну основу для дослідження еволюції зв'язків між файлами вхідного коду на основі даних із систем керування версіями. Такий підхід дає змогу виявляти приховані залежності між компонентами, оцінювати силу зв'язків і відстежувати їх трансформації у часі.

Запропонована модель охоплює повний цикл обробки даних, починаючи від добування історії змін і завершуючи виявленням еволюційних подій між кластерами файлів. Центральною ідеєю є представлення історії змін у вигляді послідовності графів співзмін, де вершини відповідають окремим файлам, а ребра описують логічні зв'язки між ними. Вага ребра визначається як міра сили зв'язку, що відображає частоту або ступінь одночасної зміни двох файлів.

Використання графової моделі є доцільним, оскільки вона природно відображає структуру взаємозв'язків між файлами та підтримує широкий спектр формальних методів аналізу. До них належать пошук спільнот, виявлення центральних елементів і дослідження динаміки мережі у часі. На відміну від табличних або векторних подань, графове представлення забезпечує більш

інтуїтивне трактування логічних залежностей і легко розширюється часовим виміром.

Загальний процес аналізу включає добування та очищення даних із репозиторію, побудову графів співзмін для окремих часових інтервалів та кластеризацію груп файлів у межах кожного вікна на основі структури цих графів. На завершальному етапі здійснюється відстеження еволюції отриманих кластерів у часі. Для формалізації концептуальної моделі цей процес подано у вигляді узагальненої схеми (рис. 1).

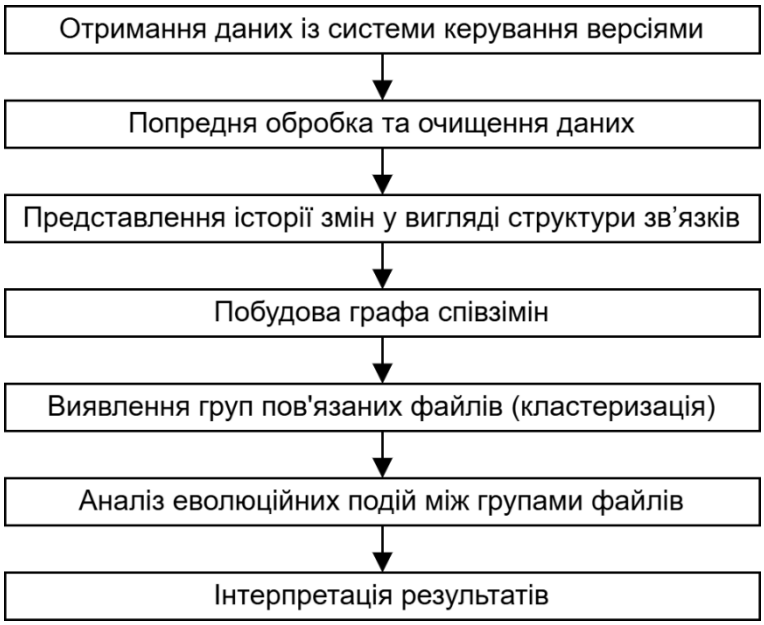


Рис.1. Графічна схема концептуальної моделі аналізу історії змін ПЗ

Запропонована концептуальна модель пов'язує дані систем керування версіями з архітектурним представленням ПЗ, дозволяючи досліджувати зміни в системі у часовому вимірі.

Далі розглянуто математичний апарат формування вхідних даних для аналізу історії змін ПЗ. При цьому розглядаються події модифікацій файлів, кожна з яких містить часову позначку та множину змінених файлів. Події, отримані з репозиторію системи керування версіями, формують початкову структуру даних.

Позначимо множину всіх файлів вхідного коду ПЗ через F, а послідовність подій змін – через L:

$$F = \{f_1, f_2, ..., f_m\}, \quad (1)$$

$$L = \langle l_1, l_2, ..., l_n \rangle. \quad (2)$$

Кожна подія зміни l_i визначається як підмножина файлів, які були змінені в межах цієї події:

$$l_i = \left\{ f_j \mid f_j \in F, f_j \text{ змінено в події } l_i \right\},\ l_i \subseteq F,\ i = 1,2,...,n. \qquad (3)$$

Таким чином, історію змін можна інтерпретувати як упорядковану послідовність пар $\left(t_i, l_i\right)$, де t_i – мітка часу настання події, а l_i – множина змінених файлів у цій події:

$$H = \left\langle \left(t_i, l_i\right) \mid i = 1,2,...,n \right\rangle. \qquad (4)$$

Під час аналізу історії змін важливо враховувати, що файл у системі контролю версій може змінювати ім'я або своє розташування у структурі проєкту. Якщо розглядати такі випадки буквально, це призводить до появи нових об'єктів у кожній події зміни, хоча фактично йдеться про той самий логічний файл. Щоб уникнути цього, вводиться відображення, що зіставляє фізичні файли їхнім канонічним ідентифікаторам:

$$\phi : F \to F^*, \qquad (5)$$

де F^* – множина канонічних ідентифікаторів логічних файлів.

Отже, для кожного файлу $f_j \in F$ визначається відповідний канонічний ідентифікатор:

$$f_j^* = \phi\left(f_j\right),\ \ f_j^* \in F^*. \qquad (6)$$

Множину всіх канонічних ідентифікаторів файлів можна подати як:

$$F^* = \left\{ f_1^*, f_2^*, ..., f_k^* \right\},\ \ k \le m, \qquad (7)$$

де k – кількість унікальних логічних файлів, що існували в історії змін, а m – кількість усіх фізичних файлів, які з'являлися у історії змін.

Відображення ϕ може бути побудоване на основі функції подібності між вмістом файлів. Нехай

$$s : F \times F \to [0,1] \qquad (8)$$

це функція, що визначає ступінь подібності між двома версіями файлів.

Якщо значення подібності $s\left(f_i, f_j\right)$ перевищує певний поріг τ, то вважається, що ці файли представляють один логічний об'єкт і мають однаковий канонічний ідентифікатор:

$$s(f_i, f_j) \geq \tau \Rightarrow \phi(f_i) = \phi(f_j). \quad (9)$$

Після застосування відображення ϕ усі події зміни переписуються у термінах канонічних ідентифікаторів файлів. Тобто для кожного коміту l_i визначається оновлена множина:

$$l_i^* = \{\phi(f_j) \mid f_j \in l_i\}, \quad l_i^* \subseteq F^*. \quad (10)$$

У результаті формується впорядкована історія змін з урахуванням канонічних ідентифікаторів:

$$H^* = \langle (t_i, l_i^*) \mid i = 1,2,...,n \rangle. \quad (11)$$

Під час формування впорядкованої історії змін необхідно також врахувати події створення та видалення файлів.

Файл, що був видалений у події зміни l_i, розглядається як елемент, присутній лише в інтервалі $[t_{create}, t_{delete})$, де t_{create} – момент його першої появи, а t_{delete} – момент видалення. Такі файли залишаються у множині F^*як логічні елементи історії змін, проте не беруть участі у побудові подальших зв'язків після моменту видалення. Це дозволяє зберегти цілісність часової моделі та уникнути появи зв'язків між файлами, які вже не існували. Формально ця умова задається співвідношенням:

$$f_j^* : \begin{cases} \text{активний у } [t_{\text{create}}, t_{\text{delete}}) \\ \text{не враховується при } t > t_{\text{delete}} \end{cases} \quad (12)$$

Узгоджена історія змін H^*, сформована з урахуванням канонічних ідентифікаторів файлів, слугує основою для побудови аналітичних структур даних. На основі цієї історії обчислюються частоти спільних змін та формуються матриці інтенсивності взаємозв'язків між файлами. Отримані структури використовуються як проміжне представлення для подальшого аналізу і формування часових підмножин історії змін.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Таким чином, запропоновано концептуальну модель аналізу змін програмного забезпечення, яка забезпечить комплексне виявлення та аналіз еволюції зв'язків між файлами вхідного коду. Модель поєднує обробку історії комітів, обчислення мір подібності, кластеризацію співзмін і порівняння кластерів у часі, що створить основу для глибшого розуміння структурної еволюції програмних систем і розроблення інструментів підтримки рефакторингу та супроводу. Розглянуто

математичний апарат формування вхідних даних для аналізу історії змін. Перспективами подальших досліджень є розробка математичного апарату для подальших кроків запропонованої моделі, його програмна реалізація та її тестування на синтезованих та реальних даних історій змін програмного забезпечення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alenezi, M. (2021). Internal Quality Evolution of Open-Source Software Systems. Applied Sciences, 11(12), 5690. https://doi.org/10.3390/app11125690.
2. Michelon, Gabriela & Obermann, David & Assunção, Wesley & Linsbauer, Lukas & Grünbacher, Paul & Fischer, Stefan & Lopez-Herrejon, Roberto & Egyed, Alexander. (2022). Evolving software system families in space and time with feature revisions. Empirical Software Engineering. 27. 10.1007/s10664-021-10108-z.
3. Lehman's Laws of Software Evolution [Електрон. ресурс]. Режим доступу: https://www.linkedin.com/posts/bd-90_lehmans-laws-of-software-evolution-activity-7087689628958232576-NHXo (дата звернення: 05.11.2025).
4. Ahmand, Noman & Su, Ruoyu & Esposito, Matteo & Janes, Andrea & Lenarduzzi, Valentina & Taibi, Davide. (2025). Architectural Degradation: Definition, Motivations, Measurement and Remediation Approaches. 10.48550/arXiv.2507.14547.
5. Baabad, Ahmed & Zulzalil, Hazura & Hassan, Sa'adah & Baharom, Salmi. (2020). Software Architecture Degradation in Open Source Software A Systematic Literature Review. IEEE Access. 173681 – 173709. 10.1109/ACCESS.2020.3024671.
6. Le, Duc & Behnamghader, Pooyan & Garcia, Joshua & Link, Daniel & Shahbazian, Arman & Medvidovic, Nenad. (2015). An Empirical Study of Architectural Change in Open-Source Software Systems. 10.1109/MSR.2015.29.
7. Що таке коміти в Git? Основи для роботи з ними [Електрон. ресурс]. Режим доступу: https://itedu.center/ua/blog/review/shcho-take-komity-v-git/ (дата звернення: 05.11.2025).
8. Soliman, Mohamed & Albonico, Michel & Malavolta, Ivano & Wortmann, Andreas. (2025). Mining software repositories for software architecture – A systematic mapping study. Information and Software Technology. 181. 107677. 10.1016/j.infsof.2025.107677.
9. Codabux, Zadia & Fard, Fatemeh & Verdecchia, Roberto & Palomba, Fabio & Nucci, Dario & Recupito, Gilberto. (2024). Teaching Mining Software Repositories. 10.1007/978-3-031-71769-7_12.
10. Silva, Luciana & Valente, Marco & Maia, Marcelo. (2015). Co-change Clusters: Extraction and Application on Assessing Software Modularity. Transactions on Aspect-Oriented Software Development. 10.1007/978-3-662-46734-3_3.

УДК 004.852:004.93’1

М.В. Панченко[1], П.І. Сагайда[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ECAPA-TDNN ДЛЯ ГОЛОСОВОЇ БІОМЕТРІЇ: ПЕРЕВАГИ НАД X-VECTORS ТА RESNET ДЛЯ ІНТЕГРОВАНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ МОВЦЯ ТА АНТИСПУФІНГУ

Анотація. У роботі представлено концепт інтегрованої системи голосової біометрії, що поєднує верифікацію мовця (SV) та захист від спуфінгових атак (AS) на основі єдиної архітектури ознак ECAPA-TDNN. Запропонований уніфікований підхід дозволяє створювати легші, більш стійкі до шумів та ефективніші системи, що критично важливо для протидії сучасним Deepfake-атакам та спрощує масштабованість біометричної платформи.

Ключові слова: *голосова біометрія, верифікація мовця, антиспуфінг, ECAPA-TDNN, нейронні мережі, ембеддинги мовлення*

Вступ. Верифікація мовця (Speaker Verification, SV) та захист від спуфінгу (Anti-Spoofing, AS) є ключовими складовими сучасних голосових біометричних систем, оскільки голос дедалі частіше використовується як зручний і природний засіб автентифікації. SV забезпечує перевірку заявленої особи шляхом зіставлення поточного голосового сигналу з еталонним зразком, що дозволяє реалізувати безпечний доступ до сервісів і персоналізованих функцій у банківських, мобільних та IoT-системах. Натомість AS спрямований на виявлення та блокування спуфінгових атак, коли зловмисники намагаються імітувати голос користувача за допомогою відтворення записів, синтезованого мовлення або технологій перетворення голосу.

Постановка задачі. Дослідження та порівняння ефективності моделей ECAPA-TDNN та класичних підходів, зокрема x-vectors і ResNet, для інтегрованої системи голосової біометрії, яка виконує одночасно верифікацію мовця та захист від спуфінгу. Основним підходом є всебічний аналіз можливостей кожної архітектури з метою виявлення її здатності забезпечувати високу точність, робастність до шумів, акустичних варіацій та сучасних атак Deepfake.

Основний зміст роботи. TDNN-базований екстрактор x-векторів забезпечує отримання фіксованих векторних представлень аудіосегментів довільної тривалості та вирізняється високою ефективністю у задачах верифікації мовця. Його архітектура побудована на time-delay neural network, яка агрегує локальні часові залежності у мовному сигналі та дає змогу опрацьовувати мовні фрагменти різної довжини без втрати структурної інформації. Завдяки цьому x-вектори стали практичним і широко застосовуваним базовим підходом у багатьох системах SV [1].

У сучасних дослідженнях наголошується, що для забезпечення високої робастності у реальних акустичних умовах архітектурі TDNN необхідні

додаткові механізми контекстного моделювання. Зокрема, автори підкреслюють, що традиційна структура TDNN, яка лежить в основі x-векторів, має обмеження в здатності охоплювати довготривалий контекст мовлення. [2]

ResNet-базовані моделі формують глибші та більш виразні ембеддинги мовного сигналу завдяки використанню розгалуженої архітектури згорткових нейронних мереж та залишкових блоків. Завдяки їм мережа здатна навчати багаторівневі ознаки, долаючи проблему затухання градієнтів у глибоких архітектурах і забезпечуючи більш стабільне тренування [3]. У контексті завдань SV та AS такий підхід дозволяє ефективніше моделювати складні акустичні закономірності та підвищувати дискримінативність ембеддингів.

Однак збільшення глибини та кількості параметрів робить ResNet-моделі більш схильними до перенавчання, особливо у випадках, коли тренувальні дані містять значний рівень шумів або мають нерівномірну якість.

ECAPA-TDNN є удосконаленою архітектурою на основі TDNN, яка поєднує механізми каналової уваги Squeeze-and-Excitation (SE), багатомасштабні Res2Net-блоки та покращені методи агрегації ознак. Завдяки SE-модулям модель навчається виділяти найбільш інформативні канали, тоді як Res2Net забезпечує багаторівневе представлення часових залежностей, що дозволяє враховувати різні масштаби акустичної інформації. Крім того, вдосконалена система статистичної агрегації з увагою по каналах підсилює значущі фрейми для кожної ознаки, що робить отримані ембеддинги суттєво більш дискримінативними та стійкими у завданнях верифікації мовця.

Такі архітектурні вдосконалення забезпечують істотний приріст точності порівняно з традиційними TDNN та CNN-підходами, особливо у сценаріях із наявністю шумів, спотворень та міжмовних варіацій. ECAPA-TDNN стала сучасним стандартом для побудови високоточних систем SV/AS, поєднуючи високу робастність та здатність до узагальнення [4].

Наукова новизна. Запропонований концепт інтегрованої системи верифікації мовця та антиспуфінгу передбачає використання ECAPA-TDNN як єдиної базової архітектури для екстракції голосових ознак. Хоча модель вже зарекомендувала себе як провідна архітектура для окремої задачі верифікації мовця [4], на відміну від попередніх інтегрованих систем на базі x-vector, архітектура ECAPA-TDNN завдяки механізмам уваги та Res2Net забезпечує формування більш узгодженого та дискримінативного простору ембеддингів для обох задач. Це, як очікується, дозволить істотно підвищити стійкість до акустичних варіацій та сучасних атак Deepfake [5]. Крім того, збереження легкості та мінімізація ризику перенавчання є ключовою перевагою над глибокими CNN-архітектурами типу ResNet. На основі цих уніфікованих представлень пропонується побудова двох паралельних модулів (SV та AS), що підвищує масштабованість, надійність та ефективність тренування компонентів системи на різних наборах даних (наприклад, VoxCeleb для SV та ASVspoof для AS).

Висновки. ECAPA-TDNN забезпечує формування більш дискримінативних і робастних голосових ембеддингів завдяки механізмам каналової уваги та багатомасштабним блокам, що усуває обмеження традиційних x-vector моделей у врахуванні довготривалого контексту. Порівняно з ResNet, архітектура є обчислювально ефективнішою та менш схильною до перенавчання, зберігаючи високу точність у складних акустичних умовах. Використання ECAPA-TDNN як уніфікованої бази ознак для модулів верифікації мовця та антиспуфінгу підвищує стійкість системи до сучасних атак Deepfake та створює основу для побудови масштабованих, надійних голосових біометричних платформ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Snyder D., Garcia-Romero D., Sell G., Povey D., Khudanpur S. X-Vectors: Robust DNN Embeddings for Speaker Recognition. *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).* Calgary, AB, Canada, 2018. P. 5329-5333. DOI : https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461375.
2. Huang H., Xiang X., Yang Y., Ma R., & Qian Y. AISPEECH-SJTU accent identification system for the Accented English Speech Recognition Challenge. *arXiv preprint arXiv:2102.09828*. 2021.
3. He K., Zhang X., Ren S., & Sun, J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 2021. P. 770–778. DOI : https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90
4. Desplanques B., Thienpondt J., Demuynck K. ECAPA-TDNN: Emphasized Channel Attention, Propagation and Aggregation in TDNN Based Speaker Verification. *Proc. Interspeech*, 2020. P. 3830-3834. DOI : https://doi.org/10.21437/Interspeech.2020-2650
5. Alsalihi M.H., Sztahó D. (2025). Spoof speech classification using deep speaker embeddings and machine learning models. *Array.* 2025. Vol. 27, 100494. DOI : https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100494 .

УДК 004.415.3:681.6

С.Д. Приходченко[1], О.С. Шевцова[1], Б.П. Калінкін[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ У ЗАДАЧІ МАШИННОГО ПЕРЕКЛАДУ

Анотація. В роботі досліджено використання трансформерних моделей у задачі машинного перекладу, зокрема розглянуто архітектуру **Transformer**, а також сучасні реалізації - MarianMT та mBART. Метою дослідження є визначення переваг і недоліків трансформерних моделей у порівнянні з попередніми архітектурами (RNN, LSTM) та оцінка якості перекладу за допомогою метрик BLEU, METEOR і TER. Проведено аналіз наукових публікацій, експериментів у середовищі HuggingFace Transformers, а також огляд методів вимірювання точності перекладу. Результати свідчать, що моделі MarianMT і mBART демонструють високу якість перекладу навіть для мов із обмеженими ресурсами, зокрема української.

Ключові слова: *машинний переклад, трансформер, MarianMT, mBART, нейронні мережі, BLEU, оцінка якості перекладу.*

Вступ. Сучасний розвиток інформаційних технологій спричинив стрімке зростання обсягів текстової інформації, що потребує оперативного перекладу різними мовами. У зв’язку з цим машинний переклад став однією з ключових галузей досліджень у сфері штучного інтелекту та обробки природної мови. Його застосування охоплює найрізноманітніші сфери - від перекладу вебконтенту й технічної документації до систем підтримки багатомовної комунікації в бізнесі, освіті та науці.

Протягом останніх років найефективнішим підходом до розв’язання задач машинного перекладу стала архітектура Transformer. На відміну від попередніх рекурентних і згорткових нейронних мереж, трансформер використовує механізм Self-Attention, що дозволяє моделі ефективно враховувати контекст у всьому реченні та забезпечує високу якість перекладу [1]. На основі цієї архітектури створено низку сучасних моделей, зокрема MarianMT, mBART, які демонструють високу точність і гнучкість при роботі з багатомовними текстами.

Однак, попри значний прогрес у цій галузі, постає проблема вибору оптимальної моделі машинного перекладу для конкретних умов використання. Кожна модель має свої особливості - від розміру та обчислювальної складності до специфіки навчання та підтримуваних мовних пар. У зв’язку з цим актуальним є питання порівняльного аналізу ефективності трансформерних моделей за показниками якості перекладу, швидкодії та ресурсоспоживання.

Актуальність теми полягає в необхідності підвищення ефективності машинного перекладу шляхом вибору найбільш придатної моделі для конкретних мовних пар і умов роботи. Отримані результати можуть бути

використані для створення оптимізованих систем перекладу, здатних забезпечити високу якість при мінімальних обчислювальних витратах.

Мета дослідження – проаналізувати ефективність сучасних трансформерних моделей машинного перекладу (MarianMT, mBART) та визначити оптимальну модель для перекладу українсько-англійських текстів з урахуванням якості, швидкодії та продуктивності.

Для досягнення мети в роботі поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати принципи роботи архітектури Transformer та її ключові компоненти.
2. Ознайомитися з особливостями моделей MarianMT, mBART.
3. Створити експериментальне середовище для тестування моделей перекладу.
4. Провести оцінку якості перекладу за допомогою метрик BLEU, METEOR.
5. Порівняти результати експериментів і визначити ефективність кожної моделі за різними критеріями.
6. Сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальної моделі для практичного використання.

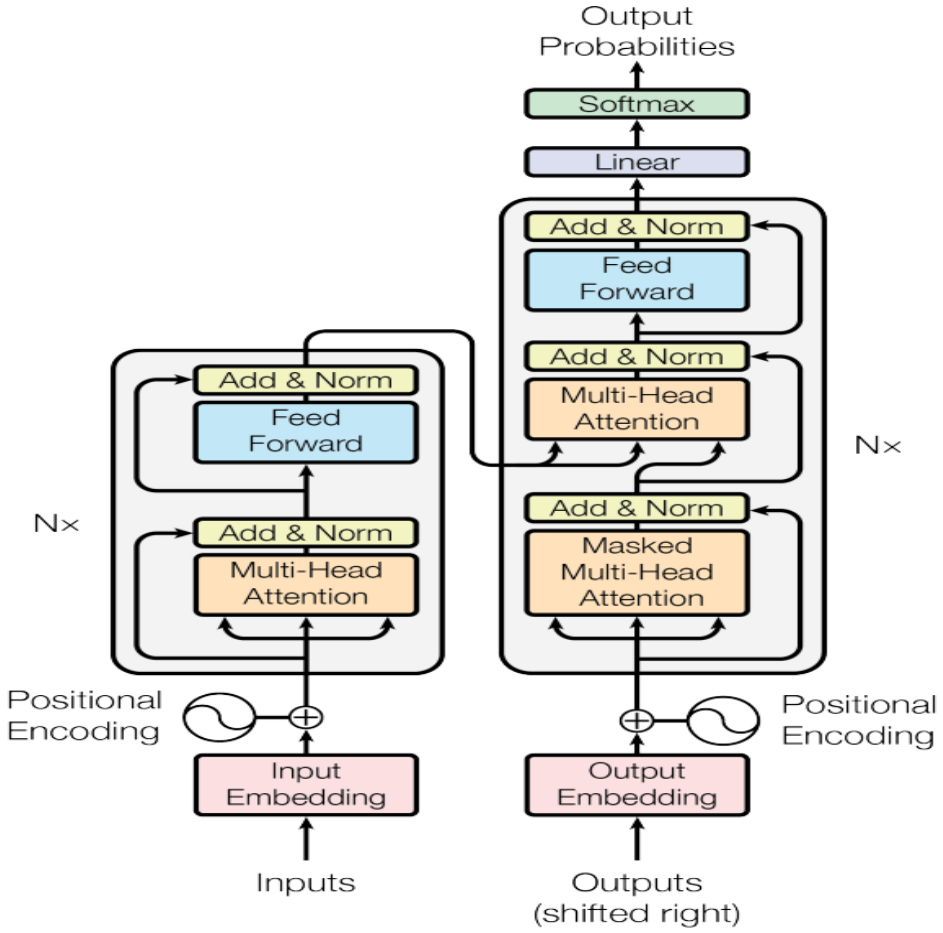


Рис. 1. Архітектура трансформера

Архітектура Transformer базується на механізмі self-attention (Рис. 1), який дозволяє моделі одночасно аналізувати всі елементи вхідної послідовності, встановлюючи вагові зв'язки між словами залежно від контексту. Це забезпечує більш точне врахування синтаксичних та семантичних зв'язків у тексті. Завдяки цій особливості трансформери витіснили попередні архітектури, такі як RNN та LSTM, які мали труднощі з обробкою довгих залежностей [2-4].

Модель MarianMT, створена в Microsoft Research, реалізує архітектуру Transformer і підтримує десятки мовних пар. Вона використовується у проєкті OPUS-MT, що надає відкриті моделі для перекладу між різними мовами.

mBART (Multilingual Bidirectional and Auto-Regressive Transformer) - це модель, навчена на 25 мовах одночасно. Вона здатна не лише перекладати тексти, а й виконувати інші завдання, такі як узагальнення, переформулювання або корекція помилок.

Оцінювання якості машинного перекладу - важливий етап перевірки ефективності моделі. Існують як автоматичні, так і ручні методи оцінювання. У даній роботі розглядаються дві основні автоматичні метрики: BLEU та METEOR.

BLEU – це найпоширеніша метрика для оцінки автоматичного перекладу. Вона базується на підрахунку збігів n-грам між перекладом моделі та еталонним перекладом людини.
Чим більше збігів – тим вищий бал BLEU. Однак BLEU не враховує синонімію та граматичну варіативність, тому її часто поєднують з іншими метриками.

Candidate	the	the	the	the	the	the	the
Reference 1	the	cat	is	on	the	mat	
Reference 2	there	is	a	cat	on	the	mat

Рис. 2. Приклад обчислення BLEU для фрази "the cat is on the mat"

Метрика METEOR була розроблена для подолання недоліків BLEU. Вона враховує не лише точні збіги слів, а й синоніми, морфологічні варіації та порядок слів. Розрахунок базується на гармонічному середньому між точністю та повнотою, що забезпечує більш людське оцінювання якості перекладу[5-6].

Для проведення порівняльного аналізу моделей MarianMT та mBART було побудовано експериментальне середовище на основі бібліотеки HuggingFace Transformers, що забезпечує уніфікований доступ до різних архітектур машинного перекладу. В експериментах використовувалися моделі Helsinki-NLP/opus-mt-en-uk та Helsinki-NLP/opus-mt-uk-en (MarianMT), а також багатомовна модель facebook/mbart-large-50-many-to-many-mmt (mBART). Для оцінювання якості перекладу застосовувалися метрики BLEU та METEOR, реалізовані у бібліотеці evaluate.

Для обох моделей було виконано переклад тестового фрагмента українсько-англійського художнього тексту з подальшим обчисленням показників BLEU та METEOR. Тестовий приклад було обрано таким чином, щоб містити складні синтаксичні конструкції, поетичні образи та контекстуальні зв'язки, що дозволяє оцінити здатність моделей працювати з довгими залежностями та стилістичними особливостями [7-10].

Для забезпечення однакових умов експерименту було реалізовано єдиний скрипт Python, який виконує:

- завантаження моделей та відповідних токенайзерів;
- переклад тексту в обидва напрямки (en→uk, uk→en);
- токенізацію і нормалізацію вихідних та отриманих текстів;
- автоматичне обчислення BLEU і METEOR;
- формування підсумкової таблиці з результатами.

Таким чином, обидві моделі функціонували в однакових обчислювальних умовах, що забезпечує коректність їхнього порівняння.

Перший експеримент був присвячений оцінці можливостей моделей машинного перекладу під час роботи з поетичними, ритмічно насиченими та культурно маркованими текстами. Для цього було обрано фрагмент з англомовного перекладу поеми Тараса Шевченка «Заповіт». Такий тип текстів містить метафоричні образи, емоційне забарвлення та нестандартні синтаксичні конструкції, що робить переклад складним навіть для досвідчених перекладачів, а тим більше – для автоматизованих систем.

Рис. 3. Демонстрація перекладу MarianMT і mBART

```
===== BLEU / METEOR =====
      Model       BLEU    METEOR
0  MarianMT  20.330906  0.653457
1     mBART  16.775452  0.523400
```

Рис. 4. Результат першого тесту

Аналіз вихідних перекладів виявив суттєві відмінності між досліджуваними моделями. Так, переклад MarianMT (en→uk) характеризується

адекватною передачею змісту; загалом правильною граматичною структурою; стилістично наближеним до оригіналу викладом; мінімальною кількістю буквальних помилок.

Недоліки зосереджуються переважно у спрощенні образності; частковій втраті поетичної ритмічності; незначній надмірній буквалізації окремих фрагментів.

Переклад mBART (en→uk) продемонстрував змішані результати. Модель зберегла загальний зміст, однак допустила декілька лексичних і семантичних відхилень від оригіналу; у деяких місцях створила архаїзовані або стилістично некоректні фрази; частково спотворила образи (наприклад, “the banks of the Dnieper” було перекладено як “береги Нілу”, що свідчить про помилку в моделюванні контексту); траплялися англіцизми та фрагменти, що не були перекладені коректно.

На рівні зворотного перекладу стабільність MarianMT виявилася вищою: зміст відтворено з незначними семантичними втратами. Переклад mBART у зворотному напрямку містив нові семантичні викривлення, що свідчить про менш стабільне відтворення тексту.

У межах другого експерименту проведено порівняльне оцінювання ефективності моделей MarianMT та mBART на інформаційно-аналітичному тексті англійською мовою, що описує дослідження Vosoughi et al. щодо поширення фейкових новин у соціальній мережі Twitter[10]. Текст містить статистичні дані, наукову термінологію, складні синтаксичні конструкції та семантично точні формулювання, що робить його придатним для тестування моделей на предмет точності відтворення фактографічної інформації.

Обидві моделі продемонстрували коректне загальне розуміння змісту, однак точність передавання деталей істотно відрізняється.

Таблиця 1

Приклад різниці перекладів (фрагмент тексту)

Оригінал	**MarianMT (uk)**	**mBART (uk)**
“False news reached more people than the truth.”	*“Фальшиві новини досягли більшої кількості людей, ніж правда.”*	*“Неправдиві новини дісталися до людей більше, ніж правда.”*
“Vosoughi et al. used a data set…”	*Вошоуі і т.п. використовується набір…”*	*“Восохи та інші використовували дані…”*
“Falsehood also diffused faster.”	*“Фальшиве походження поширювалося швидше…”*	*“Неправдивість поширювалася швидше…”*

Переклад MarianMT (en→uk) зберігає основну структуру та термінологію тексту; коректно передає числові дані, часові рамки і причинно-наслідкові зв’язки; граматично узгоджений і стилістично наближений до науково-інформаційного стилю.

Водночас наявні окремі недоліки: нерівномірність стилю (наприклад, фраза «Вошоуі і т.п.» є результатом некоректної обробки прізвища та посилання “et al.”); поодинокі некоректні символи (наприклад, “}3 мільйони”), що ймовірно виникли під час токенізації або розпізнавання спецсимволів; часткова втрата плавності викладу через буквальний переклад деяких сегментів.

Переклад mBART (en→uk) виявив більш широке коло слабких місць: зберігає основний зміст, але допускає значні стилістичні та лексичні варіації; частково спотворює або неправильно інтерпретує слова («верхний 1%» замість «верхній», семантичні зсуви у фразах); деякі речення містять структурні неточності («Неправдивість поширювалася швидше, ніж правда» звучить неприродно); трапляється помітний вплив англійського синтаксису.

```
===== BLEU / METEOR =====
      Model       BLEU    METEOR
0  MarianMT  37.741245  0.623726
1     mBART   8.705492  0.366825
```

Рис. 5. Результат другого тесту

На рівні зворотного перекладу (uk→en**)** модель MarianMT продемонструвала відносно стабільне відтворення змісту, тоді як mBART значно відхилився від оригіналу та замінив окремі поняття («bad news» замість «false news», «Voodoo» замість «Vosoughi»), що свідчить про недостатню стабільність інтерпретації.

Отримані результати демонструють очевидну перевагу MarianMT:

– BLEU моделі MarianMT більш ніж удвічі перевищує показник mBART. Це означає, що переклад MarianMT значно ближчий до еталонного за лексичними та синтаксичними збігами.

– METEOR, який враховує синонімію, стемінг та відповідність змісту, також вищий у MarianMT. Це свідчить про краще семантичне відтворення тексту порівняно з mBART.

Порівняно з попереднім тестом, BLEU-показник MarianMT помітно зріс (з ~20 до ~37), що вказує на те, що ця модель особливо добре справляється з перекладом науково-аналітичних і фактографічних текстів.

Висновки. На основі проведених експериментів з використанням моделей MarianMT та mBART для перекладу українсько-англійських текстів було здійснено порівняльний аналіз їхньої ефективності за метриками BLEU та METEOR. Результати показали, що MarianMT продемонструвала кращу якість перекладу у порівнянні з mBART для досліджуваного корпусу.

За метрикою BLEU модель MarianMT отримала 20.33, тоді як mBART - 16.78, що свідчить про вищу точність n-грамних збігів з еталонним перекладом. Аналогічна тенденція спостерігається й за метрикою METEOR, яка враховує синонімію та морфологічні варіації: MarianMT досягла значення 0.653**,** тоді як

mBART – 0.523. Це вказує на те, що MarianMT краще зберігає лексичну та граматичну відповідність вихідному тексту.

Попри нижчі показники, mBART демонструє сильні сторони, зокрема здатність до глибшого контекстного узгодження та генерації більш «вільних» перекладів, що інколи є корисним для стилістично складних текстів. Однак у конкретному експерименті така свобода призводила до появи помилок, семантичних зміщень та неточностей (наприклад, неправильна інтерпретація слів, заміна назв, зміна структури речень).

Отже, за результатами аналізу можна зробити висновок, що для практичних задач перекладу українсько-англійських текстів із вимогою стабільності та точності більш оптимальною є модель MarianMT - вона демонструє вищу якість за BLEU і METEOR, а також більш передбачувану поведінку. Модель mBART доцільно використовувати у ситуаціях, де потрібна гнучкість, багатомовність або додаткові трансформації тексту (перефразування, узагальнення тощо). Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення корпусів для навчання, адаптацію моделей під окремі домени та комбінування підходів для досягнення кращої якості перекладу складних текстів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Vaswani, A. et al. (2017). *Attention Is All You Need*. NIPS.
2. Junczys-Dowmunt, M. et al. (2018). *Marian: Fast Neural Machine Translation in C++*. ACL.
3. Liu, Y. et al. (2020). *Multilingual Denoising Pre-training for Neural Machine Translation*. TACL.
4. Papineni, K. et al. (2002). *BLEU: a Method for Automatic Evaluation of Machine Translation*. ACL.
5. Banerjee, S., & Lavie, A. (2005). *METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation*. ACL Workshop.
6. Snover, M. et al. (2006). *Translation Edit Rate (TER)*. AMTA.
7. Koehn, P. (2020). *Neural Machine Translation*. Cambridge University Press.
8. Tiedemann, J. (2012). *Parallel Data, Tools and Interfaces in OPUS*. LREC.
9. HuggingFace Transformers Documentation (2024). https://huggingface.co/docs
10. Vosoughi S., Roy D., Aral S. The spread of true and false news online. Science. 2018. Vol. 359, no. 6380. P. 1146–1151. DOI: 10.1126/science.aap9559.

УДК 004.415.3:681.6

В.В. Спірінцев[1], А.Л. Ширін[1], В.В. Рулікова[1], А.Д. Холодюк[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

THREE.JS У СУЧАСНІЙ ВЕБРОЗРОБЦІ

Анотація. В роботі наведено можливості використання бібліотеки Three.js для створення інтерактивної 3D-графіки в сучасній веброзробці. У роботі розглянуто архітектуру Three.js та її фундаментальні компоненти, наведено приклади коду, розглянуто реальні кейси використання та перспективи розвитку у сферах WebXR (AR/VR) та WebGPU.

Ключові слова: *Three.js, веброзробка, 3D-графіка, WebGL, рендеринг, GPU, анімація.*

Вступ. Веброзробка невпинно еволюціонує, виходячи за межі статичних сторінок та простих 2D-анімацій. Сучасні користувачі очікують на динамічний, інтерактивний та захоплюючий досвід. У цьому контексті тривимірна (3D) графіка стає потужним інструментом для привернення уваги та надання унікальної взаємодії. Однією з ключових технологій, що уможливила інтеграцію 3D-графіки безпосередньо у браузер, є бібліотека Three.js.

Основний зміст роботи. Three.js – це кросбраузерна бібліотека JavaScript, яка надає високорівневий API для створення та відображення анімованої 3D-графіки у веббраузері [1]. По суті, вона є абстракцією над WebGL (Web Graphics Library) – низькорівневим API, що надає доступ до графічного процесора (GPU) комп’ютера. Якщо порівнювати, то розробка на чистому WebGL схожа на написання коду на асемблері: це можливо, але вимагає величезних зусиль для реалізації базових речей.

Для створення будь-якої 3D-сцени за допомогою Three.js необхідно розуміти її фундаментальні компоненти. Цю структуру можна порівняти зі знімальним майданчиком (рис. 1).

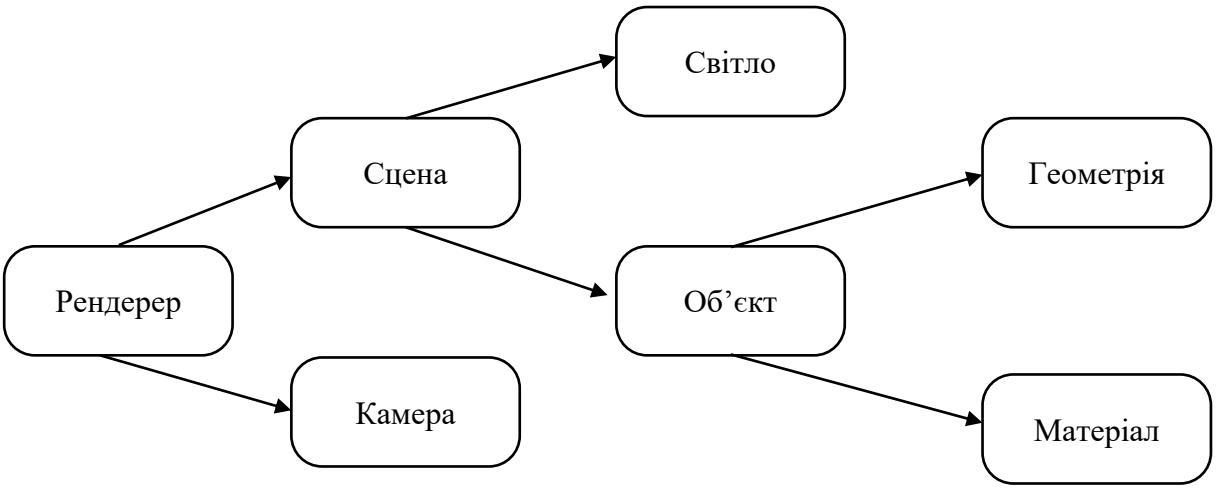


Рис. 1. Базова архітектура компонентів у Three.js

Сцена. Це контейнер, що вміщує всі об'єкти, джерела світла та камери [5].

Камера. Визначає точку огляду сцени. Існують різні типи камер, найпопулярнішими з яких є: PerspectiveCamera, яка імітує людське око, де об'єкти, що знаходяться далі, виглядають меншими; OrthographicCamera, що створює плоску проекцію без ефекту перспективи (це корисно для 2D-ігор або архітектурних візуалізацій).

Рендерер. Відповідає за відмальовування (рендеринг) сцени з погляду камери. Найчастіше використовується WebGLRenderer, який використовує WebGL для апаратного прискорення графіки. Результат його роботи відображається в HTML елементі <canvas>.

Об’єкти. Це видимі елементи у сцені. Кожен об'єкт (Mesh) складається з двох частин: геометрії та матеріалу. Геометрія тут – це набір вершин та граней, що визначають форму об’єкта. А матеріал визначає зовнішній вигляд об’єкта, наприклад, колір і текстуру.

Світло. Без світла більшість матеріалів у сцені будуть виглядати чорними. Three.js пропонує різні типи джерел світла, такі як розсіяне світло, спрямоване (як сонце) та точкове джерело.

Анімаційний цикл. Для створення руху використовується цикл, так званий requestAnimationFrame, який на кожному кадрі оновлює стан об’єктів і викликає рендерер для перемальовування сцени.

Наведений на рис. 2. код демонструє приклад створення сцени у якій обертається куб.

У цьому коді послідовно виконуються кроки:

1. Ініціалізація, тобто створення сцени, перспективної камери та рендереру, який прив'язується до DOM-дерева сторінки.
2. Визначається геометрія (куб розміром 1 x 1 x 1) та матеріал (MeshBasicMaterial). Потім іде об’єднання їх у Mesh і додавання на сцену.
3. В кінці запускається функція animate(), яка у циклі requestAnimationFrame змінює властивості обертання (rotation) куба і викликає рендерер для оновлення зображення на кожному кадрі.
4. Звісно, можливості не обмежуються примітивами. Потужність Three.js розкривається при роботі зі складними 3D-моделями, зазвичай у форматі glTF. За допомогою спеціальних завантажувачів (GLTFLoader) можна імпортувати моделі, створені у Blender чи 3ds Max, і «оживити» їх у браузері.
5. Three.js давно вийшов за межі експериментальних проєктів і став стандартом для створення 3D-графіки у веброзробці. Його використовують як невеликі креативні студії, так і технологічні гіганти. Однією з найпопулярніших сфер застосування є інтерактивні портфоліо та промо-сайти. На рис. 4 наведено результат використання бібліотеки Three.js при створенні особистого сайта-портфоліо французького розробника Бруно Сімона (Bruno Simon) – це мінігра, де користувач керує машинкою у 3D-світі, взаємодіючи з об'єктами, що представляють його проєкти. Його курс «Three.js Journey» вважається одним із найкращих ресурсів для вивчення цієї бібліотеки.

```
// 1. Ініціалізація сцени, камери та рендерера
const scene = new THREE.Scene()
const camera = new THREE.PerspectiveCamera(
    75,
    window.innerWidth / window.innerHeight,
    0.1,
    1000
)
const renderer = new THREE.WebGLRenderer()
renderer.setSize(window.innerWidth, window.innerHeight)
document.body.appendChild(renderer.domElement)

// 2. Створення об'єкта (Mesh)
const geometry = new THREE.BoxGeometry(1, 1, 1) // Форма - куб
const material = new THREE.MeshBasicMaterial({color: 0x00ff00})
const cube = new THREE.Mesh(geometry, material)
scene.add(cube) // Додаємо куб на сцену
const edges = new THREE.EdgesGeometry(geometry)
const line = new THREE.LineSegments(
    edges,
    new THREE.LineBasicMaterial({color: 0xffffff})
)
cube.add(line)

camera.position.z = 5 // Відсуваємо камеру, щоб бачити куб

// 3. Створення анімаційного циклу
function animate() {
    requestAnimationFrame(animate)

    // Обертання куба
    cube.rotation.x += 0.01
    cube.rotation.y += 0.01

    renderer.render(scene, camera) // Рендеримо сцену
}

animate()
```

Рис. 2. Приклад коду для створення куба, що обертається

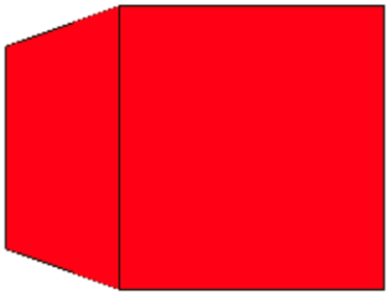


Рис.3. Результат виконання коду

Майбутнє веброзробки безпосередньо пов'язане з подальшим зануренням у тривимірний простір. Такі технології, як WebXR, що дозволяють створювати досвід доповненої (AR) та віртуальної (VR) реальності прямо в браузері, вже активно використовують Three.js як основу. Це відкриває двері для створення вебдодатків нового покоління, наприклад, віртуальних примірочних для інтернет-магазинів.

З ростом потужності пристроїв, особливо мобільних, та вдосконаленням стандартів, як-от WebGPU (наступник WebGL), продуктивність та візуальні можливості 3D-графіки в браузері лише зростатимуть. Three.js, завдяки своїй гнучкості та активній спільноті, безперечно, залишатиметься в авангарді цих змін.

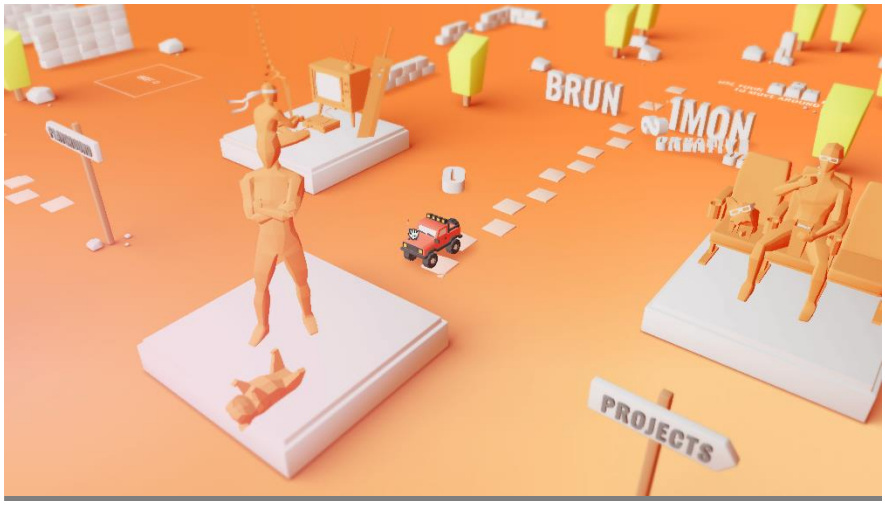


Рис.4. Портфоліо Бруно Сімона

Висновки. Використання Three.js надає розробникам низку вагомих переваг. Насамперед, це доступність: бібліотека працює у всіх сучасних браузерах, що підтримують WebGL, без необхідності встановлення додаткових плагінів. Крім того, Three.js значно спрощує та абстрагує складність WebGL, надає простий синтаксис для роботи з 3D. Важливою є висока продуктивність, яка досягається завдяки використанню апаратного прискорення GPU.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Офіційний сайт Three.js. [Електронний ресурс]. – URL: https://threejs.org (дата звернення 07.11.2025).
2. itProger. 3D Дизайн на Three.js / #1 – Розробка веб 3D-графики на основі WebGl і Three.js. [Електронний ресурс]. – URL: https://itproger.com/ua/course/three-js (дата звернення 07.11.2025).
3. KrystianRej. Pros and cons of Three.js – Discussion. 2019. [Електронний ресурс]. – URL: https://discourse.threejs.org/t/pros-and-cons-of-three-js/7050 (дата звернення 07.11.2025).
4. Awwwards. Best selection of Three.js Websites examples for your inspiration. [Електронний ресурс]. – URL: https://www.awwwards.com/websites/three-js/#google_vignette (дата звернення 07.11.2025).

УДК 378.6:371.3

А.Ю.Теліпко[1], Л.В. Кабак[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕРАКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩ ЯК НАВЧАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ РУШІЯ UNREAL ENGINE 5 ТА МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ C++

Анотація. У статті розглядається використання рушія Unreal Engine 5 та мови програмування C++ для створення інтерактивних навчальних середовищ. Аналізується потенціал новітніх технологій реального часу для підвищення ефективності навчального процесу, а також визначаються ключові технічні та методологічні підходи до розробки освітніх симуляцій, тренажерів і віртуальних лабораторій.

Ключові слова: *Unreal Engine 5, інтерактивні середовища, навчальні інструменти, C++, імерсивне навчання, симуляції, віртуальні навчальні простори, геймдизайн, освітні технології, програмування, візуалізація, педагогічна ефективність.*

Вступ. Інтерактивні цифрові середовища поступово стають повноцінним інструментом у сучасному освітньому процесі. Вони дозволяють створювати занурювальні моделі, у яких студенти можуть відтворювати реальні ситуації, проводити експерименти та взаємодіяти зі складними системами. Рушій Unreal Engine 5 (UE5) пропонує набір інструментів, які дозволяють комбінувати графічні технології нового покоління з високопродуктивною логікою на C++, роблячи його придатним для розробки повноцінних симуляцій та навчальних платформ.[1]

Основний зміст роботи. Ігрові рушії вже давно мають значний вплив на суміжні галузі, серед яких архітектурна візуалізація, промислове моделювання, кіновиробництво, військові тренажери та освітні симулятори. Серед сучасних рушіїв основне місце займають такі продукти як Unreal Engine, Unity, Godot тощо.

Unreal Engine вирізняється фотореалістичною графікою, широкими можливостями оптимізації, розвиненою фізичною моделлю та інтеграцією C++. Унікальними запатентованими особливостями рушія є такі модулі як Nanite, Lumen, Niagara, а також можливість створення складних AI-систем завдяки Behavior Trees та Environment Query System (EQS). Lumen дозволяє симулювати глобальне освітлення в реальному часі, що робить навчальні середовища більш наочними та фізично коректними.[3] Nanite дає можливість використовувати моделі з високою полігональністю без значної втрати продуктивності, що особливо важливо для технічних дисциплін (наприклад, медицини чи інженерії), де точність геометрії має велике значення[2]. Niagara це вдосконалена система частинок та візуальних ефектів (VFX) наступного покоління, що використовується для створення динамічних та реалістичних ефектів, таких як дим, вогонь та магічні заклинання.

Загалом інструментарій та робоче середовище Unreal Engine 5 відрізняється від інших представників ринку ігрових рушіїв більш широкою цільовою аудиторією та спеціалізацією, з фокусом не тільки на ігрових проектах, а також створенні високоякісної графіки, фізичних симуляцій, відеорендерингу та 3D-моделюванні матеріалів, з численними можливостями для їхнього подальшого застосування.

C++, як основна мова Unreal Engine, забезпечує високу продуктивність, низькорівневий контроль над пам'яттю та можливість створення модулів, недосяжних у Blueprint.[4] Саме тому значна частина сучасних навчальних симуляторів ґрунтується на C++ логіці з частковим використанням Blueprint для інтеграції UI та подій. Додатково рушій має вбудовану систему Blueprints, але саме C++ забезпечує створення складної логіки, оптимізацію виконання та розширення функціональності рушія. Поєднання Blueprints та C++ часто використовується як гібридний підхід, де високорівнева логіка реалізується візуально, а критичні ділянки коду – на C++.

Інтерактивні середовища, створені на основі Unreal Engine 5, можуть застосовуватися в широкому спектрі освітніх і професійних напрямів. Зокрема, вони слугують основою для віртуальних лабораторій, що охоплюють як хімічні експерименти, так і моделювання роботи різноманітних інженерних систем. У медичній сфері такі середовища дозволяють розробляти тренажери для симуляції операцій, діагностичних процедур та вивчення фізіологічних процесів. Архітектори й містобудівники можуть використовувати UE5 для створення моделей будівель, аналізу конструктивних рішень, оцінки освітлення чи дослідження поведінки натовпів. В інженерії рушій забезпечує можливість створювати симуляції, що дають змогу випробовувати механізми, взаємодіяти з окремими деталями та аналізувати роботу обладнання. Крім того, середовища UE5 ефективно застосовуються у військовій та рятувальній підготовці, де вони дозволяють відпрацьовувати тактичні сценарії без жодного ризику для життя. Завдяки можливостям UE5 такі середовища можуть поєднувати реалістичну графіку, фізику та сценарії з адаптивними моделями навчання. Вже зараз існують такі проекти як:

1. HEROES: навчальна система для рятувальників[5]

– Симулятор моделює ситуації пошуку й порятунку у міських зонах катастроф.

– Використовується для підготовки першопроходьців та операторів гуманітарних роботів.

– Генерує синтетичні дані для навчання роботів та тренування взаємодії людей і машин у кризових сценаріях.

2. RESenv: симуляція землетрусу[6]

– Симулятор землетрусів у міських районах із реалістичною фізикою руйнування об'єктів.

– Дозволяє тренувати ІІ-системи (наприклад, планування шляху, сегментація зображення) та готувати служби порятунку до надзвичайних ситуацій.

3. Цифровий двійник для тренування рятувальників[7]

– Віртуальне середовище, створене за зразком реальних тренувальних баз для служб першого реагування.

– Інтегрує симуляцію бездротового зв'язку та комунікаційні сценарії для тренування координації дій у надзвичайних ситуаціях.

4. Архітектурна візуалізація та навчання проектуванню

– Створення інтерактивних віртуальних прогулянок архітектурними спорудами.

– Студенти та інженери можуть змінювати конфігурацію будівель, тестувати інженерні системи та досліджувати дизайн у реальному часі.

– Середовище використовується як навчальний тренажер для архітектурних факультетів.

5. Інтерактивні презентації віртуальної реальності

– Створення VR-презентацій студентами-дизайнерами для демонстрації проєктів.

– Дає глибше занурення для глядачів та підсилює візуальну комунікацію.

– Студенти тренуються з ландшафтами, освітленням, mesh-асетами та плагінами Unreal Engine.

Використання Unreal Engine 5 та мови C++ у навчальному процесі дає змогу значно підвищити рівень залучення студентів завдяки поєднанню інтерактивності та високої візуальної достовірності. Такі середовища дозволяють безпечно відтворювати потенційно небезпечні або дорогі експерименти, пропонуючи альтернативу реальним лабораторним умовам. Крім того, UE5 підтримує індивідуалізоване навчання через адаптивну логіку та варіативність сценаріїв, що орієнтовані на потреби конкретного студента. Важливою перевагою є також можливість організовувати віддалені заняття та тренування без необхідності у фізичному обладнанні. Практика роботи у таких віртуальних просторах формує навички, які мають безпосереднє застосування у реальних виробничих процесах.

Попри розвинені можливості UE5, існує низка технічних і методологічних складнощів, що ускладнюють впровадження інтерактивних середовищ у навчальні програми. Передусім йдеться про високі вимоги до апаратного забезпечення, необхідного для забезпечення стабільної роботи складних 3D-сцен. Значним бар'єром також є потреба у глибокій підготовці викладачів або розробників, які мають володіти як технічними навичками програмування, так і розумінням педагогічних принципів. Інтеграція симуляцій у традиційні навчальні курси нерідко потребує перегляду структури освітніх програм, що може стати додатковим організаційним викликом. Окрім цього, створення якісних інтерактивних сцен та моделей є трудомістким процесом із тривалими виробничими циклами. Частковим рішенням цих проблем може бути

стандартизація розробницьких процесів, активне використання бібліотек готових навчальних модулів та формування мультидисциплінарних команд, які поєднують технічну та педагогічну експертизу.

Висновки. Unreal Engine 5 у поєднанні з C++ створює потужну платформу для розробки інтерактивних навчальних середовищ, які здатні суттєво підвищити ефективність освіти у різних галузях. Реалістичність, гнучкість та широкі можливості розширення роблять UE5 оптимальним вибором для установ, що прагнуть впроваджувати інноваційні методики навчання. Незважаючи на певні технічні складнощі, потенційні переваги значно переважають, а розвиток технологій продовжує розширювати можливості застосування інтерактивних середовищ у педагогіці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Epic Games. Unreal Engine 5 Documentation. URL: https://docs.unrealengine.com/5.0
2. Epic Games. Nanite Virtualized Geometry. URL: https://docs.unrealengine.com/5.0/nanite
3. Epic Games. Lumen Global Illumination. URL: https://docs.unrealengine.com/5.0/lumen
4. Allain R. Learning C++ by Creating Games with Unreal Engine 5. 2023. 452 p.
5. HEROES Project. Hazard Emergency Rescue Operational Education Simulator. URL: https://heroes-project
6. RESenv Earthquake Simulation Environment. URL: https://resenv-simulation
7. Digital Twin Emergency Response Simulator. URL: https://digitaltwin-training

УДК 004.415.3:681.6

Л.В. Кабак[1], В.В .Карабеза[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАВАНТАЖЕННЯ СЕРВЕРІВ У МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ЗАСОБАМИ C# ТА JAVA

Анотація. Розглянуто підходи до оптимізації розподілу навантаження між серверами в мікросервісній архітектурі з використанням мов C# та Java. Розроблено прототип системи, що дозволяє динамічно балансувати ресурси залежно від інтенсивності запитів і характеристик сервісів. Проведено тестування на симульованих навантаженнях з оцінкою завантаження CPU, пам’яті та часу відповіді сервісів. Отримані результати демонструють вплив реалізації на продуктивність та визначають оптимальні сценарії застосування обох мов у системах з великою кількістю мікросервісів.

***Ключові слова**: мікросервіси, оптимізація навантаження, балансування серверів, Java, C#, продуктивність, ресурси, паралельні запити, час відповіді, оперативна пам’ять.*

Вступ. Мікросервісні архітектури стають дедалі популярнішими в інформаційних системах, що працюють із великою кількістю користувачів та високими навантаженнями. Вони розділяють функціонал на незалежні сервіси,

забезпечуючи масштабованість розробки та можливість оновлення окремих компонентів без зупинки всієї системи. Одним із ключових аспектів таких архітектур є оптимізація завантаження серверів, яка дозволяє розподіляти ресурси, підтримувати стабільну роботу сервісів і зменшувати затримки у обробці запитів. Дослідження ефективності запропонованої системи є актуальним, оскільки забезпечує обґрунтований вибір технологій та методів оптимізації для високонавантажених систем.

Постановка задачі. Метою роботи є розробка та дослідження системи оптимізації завантаження серверів у мікросервісній архітектурі з використанням мов програмування C# та Java, а також аналіз отриманих результатів для визначення доцільності застосування кожної мови у високонавантажених програмних системах. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

– проаналізувати особливості мікросервісної архітектури та підходи до балансування навантаження між серверами;

– сформувати модель оптимізації розподілу навантаження з урахуванням інтенсивності запитів і характеристик сервісів;

– реалізувати прототип системи оптимізації завантаження серверів засобами C# та Java;

– провести тестування продуктивності обох реалізацій за показниками завантаження процесора, споживання оперативної пам’яті та часу відгуку сервісів;

– виконати порівняльний аналіз отриманих результатів і визначити доцільність застосування кожної мови програмування в мікросервісних системах з високою інтенсивністю навантаження

Основний зміст роботи. Java є об’єктно-орієнтованою мовою зі статичною типізацією, яка працює на основі віртуальної машини JVM та може застосовуватися для побудови мікросервісних і розподілених систем [1]. У мікросервісній архітектурі Java дозволяє запускати кожен сервіс як окремий процес або контейнер, забезпечуючи ізоляцію та контрольоване використання ресурсів. JVM надає механізми оптимізації виконання, що впливають на стабільність роботи при змінних навантаженнях, а система керування пам’яттю дозволяє підтримувати довготривалі обчислення та високу інтенсивність обробки запитів.

У розробці мікросервісів на Java зазвичай використовуються такі інструменти та технології:

– Spring Boot для створення REST API та управління життєвим циклом сервісів;

– Spring Cloud для конфігурації, маршрутизації запитів, взаємодії між сервісами та реалізації балансування;

– Jackson для роботи з JSON-даними;

– JPA/Hibernate для взаємодії з реляційними базами даних;

– вбудовані інструменти JVM для збору метрик, моніторингу heap-пам’яті, потоків і продуктивності.

За рахунок використання Spring Boot розробник отримує можливість швидко створювати мікросервіси з окремими точками доступу, механізмами кешування та межами відповідальності. Додавання Spring Cloud надає інструменти для маршрутизації запитів, реєстрації сервісів та обробки нестабільних мережевих ситуацій. Зазначені засоби забезпечують контрольоване завантаження серверів та зменшення часів відгуку при збільшенні кількості одночасних клієнтів.

C# є мовою зі статичною типізацією та підтримкою об’єктно-орієнтованої, компонентної і асинхронної парадигм, що працює на платформі .NET. У мікросервісній архітектурі сервіси на C# виконуються як окремі додатки або контейнеризовані компоненти, що дає можливість точно контролювати споживання ресурсів і розподіл навантаження [2]. Завдяки вбудованій підтримці асинхронного програмування система здатна обробляти значну кількість паралельних запитів без блокувальних викликів. Платформа .NET забезпечує автоматичне керування пам’яттю та оптимізацію виконання на рівні рантайму, що впливає на стабільність при інтенсивних обчисленнях.

У створенні мікросервісів на C# застосовуються такі засоби та фреймворки:

– ASP.NET Core, який використовується для побудови REST API та керування маршрутизацією запитів;
– System.Text.Json для обробки JSON-даних;
– Entity Framework Core або ADO.NET для взаємодії з реляційними БД;
– сторонні middleware-рішення для логування, авторизації та контролю потоків.

ASP.NET Core дозволяє чітко визначати точки доступу кожного сервісу, впроваджувати модулі кешування, обробки винятків та контролю API-трафіку. Підтримка контейнеризації на рівні .NET дає можливість розгортати сервіси в оркестраторах, таких як Kubernetes, та керувати кількістю екземплярів при змінному навантаженні. Інструменти діагностики .NET дають змогу отримувати метрики процесора, пам’яті, активних потоків і затримок обробки запитів, що дає підстави для оптимізації завантаження серверів [3].

У ході дослідження були створені дві реалізації системи оптимізації завантаження серверів засобами C# та Java. Обидва варіанти розгорнуті на однаковому серверному екземплярі AWS типу t3.medium [4] з такими параметрами:

– 2 vCPU;
– 4 ГБ RAM;
– Linux-середовище.

Для збору метрик застосовувалися Netdata та Collectd, що фіксують використання CPU, RAM, час відповіді та активність процесів у режимі реального часу.

Тестування включало такі етапи:

запуск сервісів C# та Java на екземплярі t3.medium;

– реєстрація базових метрик після ініціалізації;

– надсилання паралельних запитів для моделювання навантаження та роботи алгоритму розподілу;

– фіксація значень CPU, RAM та часу відповіді;

– перевірка стабільності роботи сервісів під час пікового навантаження;

– повторення сценаріїв для отримання середніх показників.

Таблиця 1

Результати тестування системи оптимізації завантаження серверів

Показник	C# (.NET)	Java (JVM)
Середнє завантаження CPU, %	55-65	60-70
Середнє використання RAM, ГБ	1.8-2.2	2.3-2.7
Середній час відповіді, мс	100-130	120-150
Кількість оброблених запитів за 1 хв	4000-5000	3800-4500

За результатами експериментів обидві реалізації системи оптимізації завантаження серверів виконували основні функції стабільно. C# демонструє кращі показники в умовах обмежених ресурсів та коротких паралельних запитів. Java забезпечує стабільну роботу при довготривалих процесах і більш високій кількості одночасних сервісів. Середнє завантаження процесора для C# становило 55–65 %, тоді як для Java – 60–70 %, що пояснюється додатковими витратами ресурсів JVM та механізмами JIT-компіляції. Використання оперативної пам’яті на сервісах C# становило 1,8–2,2 ГБ, а на Java – 2,3–2,7 ГБ через кешування та управління пам’яттю JVM. Середній час обробки запиту для C# склав 100–130 мс, тоді як Java – 120–150 мс, що пов’язано з асинхронною моделлю обробки запитів у C# та оптимізацією потоків у JVM.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає у порівняльному аналізі реалізацій системи оптимізації завантаження серверів у мікросервісній архітектурі з використанням C# та Java. У роботі оцінювалася продуктивність мікросервісів за показниками використання процесора, оперативної пам’яті та часу відповіді під різним рівнем паралельних запитів. Досліджено вплив механізмів асинхронного виконання async/await у C# та управління потоками і пам’яттю JVM у Java на швидкодію і стабільність сервісів. Розроблено методику

експериментального тестування мікросервісів на серверному екземплярі t3.medium із застосуванням Netdata та Collectd для збору даних про CPU, RAM та час обробки запитів. Отримані результати дозволяють визначити, яка мова програмування доцільніша для реалізації систем оптимізації навантаження, та розкривають закономірності зміни продуктивності сервісів під різним навантаженням, що розширює наукові знання у сфері розробки мікросервісних архітектур..

Висновки. У ході дослідження створено прототип системи оптимізації завантаження серверів засобами C# та Java. Тестування показало, що C# забезпечує менший час відповіді та нижче використання оперативної пам'яті при коротких паралельних запитах, тоді як Java демонструє стабільність і надійність під тривалим або інтенсивним навантаженням. Отримані результати дозволяють обґрунтовано вибирати мову програмування для мікросервісних архітектур залежно від характеру навантаження та ресурсних обмежень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Java Platform, Standard Edition Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.oracle.com/en/java/javase/ (дата звернення: 26.11.2025)
2. The C# Programming Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/ (дата звернення: 26.11.2025)
3. Spring Boot Reference Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://docs.spring.io/spring-boot/docs/current/reference/html/ (дата звернення: 26.11.2025)
4. .NET Documentation: ASP.NET Core [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/?view=aspnetcore-9.0 (дата звернення: 26.11.2025)

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА НАУКИ ПРО ДАНІ

УДК: 004.046:519.81:620.9

Т.А.Желдак[1], А.В. Кривокоритов[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ БІЗНЕС-РІШЕНЬ НА РИНКУ ЕНЕРГОНОСІЇВ

Анотація. У статті розглядаються інформаційні методи підтримки прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв. Описано специфіку ринку енергоносіїв, класифікацію інформаційних методів (статистичні, аналітичні, інтелектуальні), архітектуру систем підтримки прийняття рішень (СППР) та запропоновано концептуальну модель інформаційної підтримки, що інтегрує джерела ринкових даних, модулі прогнозування та оптимізації, інструменти візуалізації і модуль управлінських сценаріїв. Результати демонструють підвищення точності прогнозів та зниження операційних витрат у моделюваних сценаріях.

Ключові слова: *інформаційні методи; підтримка прийняття рішень; ринок енергоносіїв; прогнозування; оптимізація; система підтримки прийняття рішень*

Вступ. Геополітична нестабільність, зміни кліматичної політики та коливання цін на нафту і газ формують нові виклики для учасників енергетичних ринків. Для державних регуляторів, компаній-постачальників та споживачів критично важливо мати дієві моделі аналізу, прогнозування та оптимізації рішень у сфері енергетики. Це стосується як цінової політики, так і інвестицій у відновлювані джерела енергії чи інфраструктурні проекти. Бізнесові рішення щодо закупівель, формування запасів, хеджування та інвестування потребують високоякісної інформаційної підтримки. Таким чином, дослідження є актуальним не лише у теоретичному вимірі – для розвитку економічних та математичних моделей аналізу ринків енергоносіїв, – але й у прикладному плані, оскільки воно сприяє формуванню ефективних механізмів управління та прийняття рішень у сучасних енергетичних системах.

Мета статті – розробити та апробувати концептуальну модель інформаційної системи підтримки прийняття бізнес-рішень для учасників ринку енергоносіїв, зокрема шляхом поєднання методів прогнозування і оптимізації; провести експериментальну оцінку ефективності на умовному кейсі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах розвитку цифрової економіки питання інформаційного забезпечення процесів прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв активно досліджується у світовій та вітчизняній науковій літературі. Аналіз джерел показує, що науковці приділяють значну увагу питанням побудови систем підтримки прийняття рішень (СППР),

застосуванню великих даних, штучного інтелекту, машинного та підкріплювального навчання в енергетичній аналітиці.

У класичній роботі Keen і Scott Morton (1978) закладено теоретичні основи концепції СППР, які розглядаються як інтеграційна ланка між інформаційними технологіями та управлінськими процесами. Автори визначають СППР як інструмент підвищення ефективності організаційних рішень у складних середовищах. Дослідження Kozhakhmetova (2024) фокусується на використанні штучного інтелекту для вдосконалення управління проектами. Показано, що методи машинного навчання забезпечують точнішу оцінку ризиків і дозволяють формувати адаптивні рішення в умовах невизначеності – що має безпосередню аналогію у сфері енергоринку.

У роботі Wang і Zhang (2023) представлено архітектуру СППР для енергетичних компаній, що базуються на великих даних (Big Data) і хмарних технологіях. Автори розробили концептуальну модель інтеграції джерел даних (IoT, SCADA, біржові котирування) для підвищення точності прогнозів попиту й цін. Стаття Osiyevskyy і Dewald (2022) досліджує вплив цифрової трансформації на процеси прийняття рішень у компаніях енергетичного сектору. Показано, що використання аналітичних платформ, сценарного аналізу та моделей ризику сприяє зниженню невизначеності при плануванні інвестицій і постачання.

У монографії Jorion (2007) обґрунтовано методологію Value at Risk (VaR), що є універсальним інструментом оцінки фінансових ризиків. Цей підхід використовується в енергетичних компаніях для визначення рівня ризику коливання цін і планування закупівельних стратегій.

Книга Hyndman і Athanasopoulos (2018) є практичним посібником із прогнозування часових рядів. Автори детально описують методи ARIMA, ETS і комбіновані моделі, які ефективно застосовуються для прогнозування цін на нафту, газ і електроенергію. Праця Box, Jenkins і Reinsel (2015) є фундаментальним джерелом для побудови моделей часових рядів. Викладені в ній підходи до аналізу динамічних процесів широко використовуються для прогнозування ринкових тенденцій у сфері енергетики. Монографія Sutton і Barto (2018) висвітлює теоретичні та практичні аспекти навчання з підкріпленням (reinforcement learning), яке може бути використане для розробки адаптивних стратегій закупівель і управління запасами на енергетичних ринках.

Вітчизняне дослідження Юрченко та Ковальчука (2023) присвячене впровадженню інтелектуальних систем аналізу ринку енергоносіїв. Автори доводять доцільність застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування цін і попиту, наголошуючи на необхідності побудови єдиних інформаційних платформ енергетичних даних в Україні. Значний внесок у вітчизняну наукову дискусію зробили Джус і Шевчук (2021), які систематизували досвід використання інформаційних технологій в енергетиці України. Автори аналізують можливості цифрових платформ, систем моніторингу та автоматизації прийняття управлінських рішень.

Отже, узагальнення літературних джерел показує, що ефективна підтримка бізнес-рішень у сфері енергетики ґрунтується на поєднанні сучасних інформаційних технологій, моделей прогнозування, оптимізаційних методів та ризик-орієнтованого підходу. Проте, незважаючи на значну кількість досліджень, недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції математичних моделей прогнозування з практичними механізмами управління постачанням і запасами в єдиній системі підтримки рішень для ринку енергоносіїв.

Основний зміст роботи. Проведений аналіз факторів, що істотно впливають на формування прогнозу оптової ціни купівлі енергоносіїв, дозволяє зробити припущення, що основний тренд динаміки оптової ціни складатиметься з наступних складових:

– тренда, що забезпечує потреби виробництва країни;

– тренда сезонності у генерації;

– випадкових факторів, до яких слід, в першу чергу, слід віднести можливі ризики.

Узагальнена концептуальна модель інформаційної підтримки прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв надано на рис. 1.

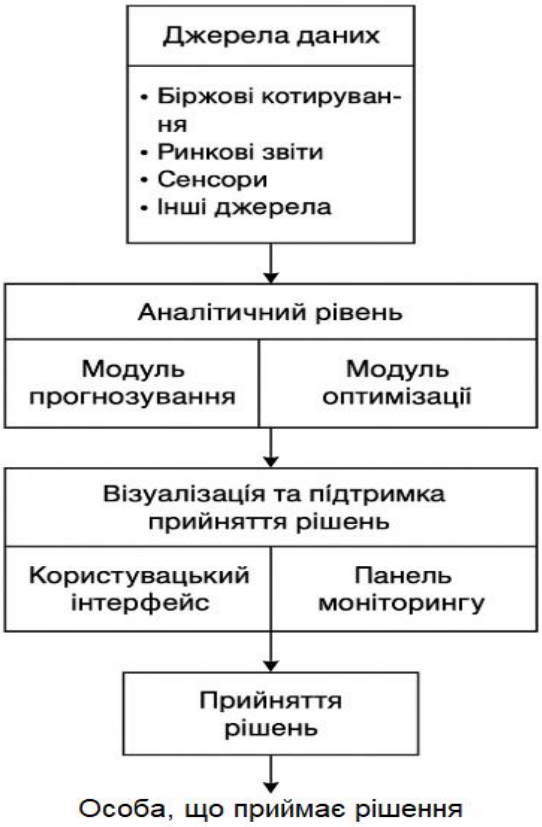


Рис. 1. Схема концептуальної моделі СППР для ринку енергоносіїв

Класична модель прогнозування цін виглядає наступним чином (1):

$$P_t = T_t + S_t + R_t, \quad (1)$$

де P_t – ціна енергоносія в момент часу t;

T_t – трендова компонента;

S_t – сезонна;

R_t – випадкова (шумова) частина.

Широко застосовується модель ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) – одна з найпоширеніших моделей часових рядів, призначена для аналізу та прогнозування показників, що змінюються у часі (наприклад, цін на газ, нафту, електроенергію, обсягів споживання). Її сутність полягає у поєднанні трьох складових компонентів (2):

$$\text{ARIMA}(p,d,q) \quad (2)$$

де: p – порядок авторегресії (*autoregressive component*),

d – порядок інтегрування або кількість диференціювання (*integration component*),

q – порядок ковзного середнього (*moving average component*).

Для поглибленого підходу використовують LSTM **(**Long Short-Term Memory), що моделює часові залежності (3):

$$h_t = \text{LSTM}(x_t, h_{\{t-1\}}), \quad (3)$$

де: h_t– поточне значення,

$h_{\{t-1\}}$ – попереднє значення,

x_t – поточне вхідне значення.

LSTM (Long Short-Term Memory) – це різновид **рекурентних нейронних мереж (RNN),** розроблена Гохрайтером і Шмідгубером у 1997 році. Основна мета – **моделювання часових залежностей великої тривалості**, що особливо актуально для аналізу ринків енергоносіїв, де поточна ціна або попит залежать не лише від учорашнього стану, а й від тенденцій попередніх тижнів чи місяців.

На відміну від класичних моделей LSTM долає проблему *зникання або вибуху градієнта*, дозволяючи ефективно «пам’ятати» як короткострокові, так і довгострокові закономірності.

Якщо ціни c_t є стохастичними (прогноз з розподілом), вирішується стохастична задача оптимізації. Рішенням може бути застосування сценарного підходу: генеруємо сценарії цін $\{c_{t\wedge s}\}$, розв'язуємо детерміністну задачу для кожного сценарію та оптимізуємо середній/варіаційний показник.

Порівняння методів, що використовують у процесах *підтримки прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв надано у* Табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння методів прогнозування та оптимізації в системах підтримки рішень на ринку енергоносіїв

Метод / Підхід	Основна ідея	Переваги	Недоліки	Застосування
ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average)	Модель часових рядів, що враховує автокореляцію між спостереженнями	Добре працює для стаціонарних рядів, висока інтерпретованість	Не враховує нелінійності, чутлива до вибору параметрів	Прогнозування цін на газ, нафту, електроенергію
LSTM (Long Short-Term Memory)	Нейронна мережа, здатна враховувати довгострокові залежності у даних	Висока точність, здатність моделювати нелінійності	Вимагає великих обсягів даних і ресурсів для навчання	Прогнозування попиту та динаміки ринку енергоресурсів
Value at Risk (VaR)	Оцінка можливих фінансових втрат із заданою ймовірністю	Простота інтерпретації, поширений стандарт у фінансовому менеджменті	Не враховує “хвости” розподілу ризиків, історичні обмеження	Аналіз ризику коливання цін на енергоносії
Метод сценарного аналізу	Оцінка альтернативних варіантів розвитку подій	Допомагає врахувати невизначеність, підтримує стратегічне планування	Суб’єктивність у формуванні сценаріїв	Планування закупівель і довгострокових контрактів
Робастна оптимізація	Оптимізація з урахуванням невизначеності параметрів	Стійкість до похибок даних, підвищена надійність рішень	Складність побудови моделей, значні обчислення	Формування збалансованих закупівельних стратегій
Reinforcement Learning (RL)	Навчання системи на основі винагороди за правильні дії	Адаптивність, можливість навчання без моделі середовища	Висока складність, потребує симуляційного середовища	Оптимізація постачань та управління запасами
Big Data-аналітика	Обробка великих обсягів різнорідних даних із різних джерел	Масштабованість швидкість обробки, комплексний аналіз	Потребує високих обчислювальних ресурсів	Інтеграція даних ринку, сенсорів, біржових систем
Моделі машинного навчання (Regression, Random Forest, XGBoost)	Побудова залежностей між факторами та результатами	Висока гнучкість, точність, здатність до самооновлення	Може втратити інтерпретованість ризик перенавчання	Класифікація ризиків, прогнозування ціни та попиту

Висновки. У статті запропоновано концептуальну модель інформаційної підтримки прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв та наведено математичні моделі прогнозування і оптимізації. Подальші дослідження мають зосередитися на: інтеграції реальних великих даних (Big Data), застосуванні методів онлайн-навчання для моделей LSTM, та розробці адаптивних сценарних підходів для управління ризиком.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Keen P.G., Scott Morton M.S. Decision Support Systems: An Organizational Perspective. — Cambridge, MA: Harvard Business School Press, 1978. — 312 p.
2. Kozhakhmetova A. Assessing the impact of artificial intelligence on project management // Knowledge and Performance Management. — 2024. — Vol. 8, №2. — P. 45–58.
3. Wang J., Zhang X. Big data-driven energy decision support systems: Architecture and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2023. — Vol. 183. — Article 113461.
4. Osiyevskyy O., Dewald J. Digital transformation and energy markets: Decision-making under uncertainty // Energy Economics. — 2022. — Vol. 107. — P. 105–118.
5. Юрченко О.В., Ковальчук С.І. Інтелектуальні системи аналізу ринку енергоносіїв // Вісник економічної науки України. — 2023. — №2(44). — С. 45–54.
6. Jorion P. Value at Risk: The New Benchmark for Managing Financial Risk. — New York: McGraw-Hill, 2007. — 512 p.
7. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice. — OTexts, 2018. — 700 p.
8. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. — Wiley, 2015. — 704 p.
9. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. — MIT Press, 2018. — 552 p.
10. Dzhus M., Shevchuk I. Інформаційні технології в енергетиці: практика та перспективи. — Київ: Енергетика, 2021. — 220 с.

УДК 658.012.32

В.М. Молоканова[1], В.Г. Цукур[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЗМІНИ ВИМОГ ДО КОМПЕТЕНЦІЙ МЕНЕДЖЕРІВ ІТ-ПРОЄКТІВ У ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У статті досліджено трансформацію вимог до професійних компетенцій менеджерів ІТ-проєктів у контексті впровадження технологій штучного інтелекту (ШІ). Проаналізовано сучасні тенденції змін у структурі hard- та soft-skills, визначено, які технічні знання стають пріоритетними — аналітика даних, робота з ML-моделями, кібербезпека, управління цифровими платформами. Водночас наголошено на посиленні значення соціально-емоційних навичок, таких як лідерство, креативність, комунікація, адаптивність та етична відповідальність у роботі з інтелектуальними системами. На основі аналізу наукових джерел і міжнародних стандартів (PMBOK, ICB 4.0) визначено нові компетентнісні орієнтири для менеджерів майбутнього. Результати дослідження можуть бути використані для оновлення освітніх програм, розроблення політик кадрового розвитку та адаптації моделей управління проєктами в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: *штучний інтелект, управління проєктами, ІТ-менеджмент, компетенції менеджера, тверді навички, м'які навички, цифрова трансформація*.

Вступ. Розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) докорінно змінює підходи до управління ІТ-проєктами (Aramali, V., et al, 2025; Castro, M., et al. 2022; Fridgeirsson, T. et al., 2021; Taboada et al., 2023). Системи, що базуються на машинному навчанні, аналітиці великих даних та автоматизованому прийнятті рішень, дедалі частіше беруть на себе значну частину рутинних управлінських завдань. Це зумовлює трансформацію ролі менеджера ІТ-проєкту: від адміністратора процесів – до аналітика, фасилітатора та стратега, який координує взаємодію між людьми й інтелектуальними системами. У цих умовах змінюються і вимоги до компетентностей менеджерів. Традиційне розмежування між **hard skills** (технічні, методологічні знання) та **soft skills** (міжособистісні та комунікативні якості) набуває нового змісту. Менеджери мають не лише розуміти технології ШІ, а й уміти застосовувати їх етично, ефективно організовувати змішані команди «людина – ШІ» та підтримувати культуру безперервного навчання. Актуальність теми полягає в тому, що сучасні компанії дедалі частіше інтегрують інтелектуальні системи у процес управління, однак професійна підготовка менеджерів не завжди встигає за цими змінами. Розуміння нових компетентнісних вимог є критично важливим для підвищення ефективності ІТ-проєктів, формування освітніх програм і оновлення корпоративних стандартів управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження демонструють активне впровадження технологій штучного інтелекту в управління проєктами, що суттєво змінює вимоги до компетенцій менеджерів (Fridgeirsson, T. et al., 2021) відзначають, що автоматизація аналітичних процесів

зменшує роль рутинних hard skills, водночас підвищуючи потребу у стратегічному мисленні та вмінні працювати з даними. (Taboada et al., 2023) підкреслюють, що знання у сфері машинного навчання, кібербезпеки й аналітики стають ключовими технічними компетенціями сучасних керівників IT-проєктів. Разом із тим, дослідження (Gonçalves і Silva, 2022) підтверджують, що soft skills — емоційний інтелект, комунікабельність, довіра — залишаються вирішальними чинниками успіху команди. Українські автори (Когут І.В., 2023; Бачинський О., 2024; Кубявка Л. Б., Латишева Т. В., 2024), акцентують на необхідності гармонійного поєднання технологічної обізнаності з лідерськими та етичними якостями менеджерів. Таким чином, сучасна парадигма управління проєктами поступово переходить від технократичного підходу до інтегрованої моделі, де людські навички доповнюють інтелектуальні системи.

Мета дослідження – проаналізувати зміни у вимогах до hard та soft skills менеджерів IT-проєктів у зв'язку з поширенням технологій штучного інтелекту. Об'єкт дослідження – професійна діяльність менеджера IT-проєкту в умовах цифрової трансформації.

Основний зміст роботи**.** Менеджер IT-проєкту – це ключова фігура, яка забезпечує досягнення цілей проєкту в межах часу, бюджету та вимог до якості. Згідно зі стандартами PMI (PM Guide, 2017; PM Guide, 20121) і IPMA (ICB 2015), його основні функції включають планування, координацію, управління ресурсами, ризиками та комунікаціями. У міжнародній практиці розрізняють дві групи компетентностей менеджера:

Hard skills – технічні знання й уміння, що стосуються методологій управління (PMBOK, PRINCE2, Agile, Scrum), роботи з цифровими інструментами (Jira, Trello, MS Project, Notion, ChatGPT, Copilot) та аналітичними системами.

Soft skills – комунікація, емоційний інтелект, адаптивність, критичне мислення, лідерство, креативність і здатність до прийняття рішень в умовах невизначеності.

Відповідно до **PMI Talent Triangle**, сучасний менеджер має поєднувати технічну, стратегічну та лідерську компетентності. Стандарт **IPMA ICB4** доповнює цей підхід блоками *perspective*, *people* і *practice*, які відображають баланс між знаннями, поведінкою й контекстом діяльності. Система **Agile Competency Framework** додає компонент *learning mindset*, тобто готовність до постійного навчання – ключову рису епохи ШІ. Традиційна модель управління проектами передбачала високу залежність від людського фактора, інтуїтивного досвіду та ручної аналітики. Проте з появою ШІ багато з цих функцій почали автоматизуватись: аналіз ризиків, прогнозування строків, розподіл завдань – усе частіше здійснюється алгоритмами, що здатні навчатися на основі історичних даних.

У міжнародній практиці розрізняють дві групи компетентностей менеджера: hard skills – технічні знання й уміння, що стосуються методологій управління, роботи з цифровими інструментами; та soft skills – комунікація,

емоційний інтелект, адаптивність, критичне мислення, лідерство, креативність. Відповідно до PMI Talent Triangle, сучасний менеджер має поєднувати технічну, стратегічну та лідерську компетентності. Стандарт IPMA ICB4 доповнює цей підхід блоками перспектива, люди і практика, а система Agile Competency Framework додає компонент навчальне мислення (learning mindset).

Сучасний стан досліджень у галузі застосування ШІ в управлінні проєктами характеризується інтенсивним розвитком та широким спектром досліджень. Все більше компаній і наукових установ розуміють потенціал ШІ для оптимізації процесів інновацій та підвищення ефективності проєктів. ШІ застосовується для автоматизації планування, прогнозування ризиків, управління завданнями, створення звітності, аналізу настроїв команди, оптимізації бюджету. Менеджер стає не просто координатором, а стратегом, який формує політику використання ШІ у команді. Його завдання – контролювати якість результатів, дбати про етичні аспекти рішень і підтримувати довіру між учасниками проєкту. Роль менеджера зміщується від виконання аналітичних операцій до перевірки та інтерпретації результатів, запропонованих системами ШІ.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз компетенцій менеджера IT-проєкту до і після впровадження ШІ

Група компетенцій	Традиційні вимоги	Вимоги в умовах застосування ШІ
Hard skills	Знання методологій управління (PMBOK, Agile), планування, контроль, робота з офісними та проєктними інструментами.	Знання принципів ШІ, аналітики даних, кібербезпеки, автоматизації процесів, етики даних.
Soft skills	Лідерство, комунікація, командна взаємодія, управління часом.	Критичне мислення, етична відповідальність, емоційний інтелект, адаптивність, фасилітація роботи з ШІ.
Роль менеджера	Координатор завдань і виконавець процедур.	Стратегічний аналітик, інтегратор людино-машинної взаємодії, модератор змін.
Інструменти роботи	Jira, MS Project, Excel.	AI-driven системи управління: Copilot, Asana Intelligence, Jira AI, Notion AI.

Інтеграція ШІ в управління проєктами відкриває нові можливості для підвищення ефективності, але одночасно формує нові виклики і ризики. Зростають вимоги до технічних компетенції нового покоління. Менеджери мають володіти знаннями в галузі аналітики даних, машинного навчання, автоматизації процесів, розуміти принципи функціонування систем ШІ та основи кібербезпеки. У зв’язку з інтеграцією інтелектуальних систем у бізнес-

процеси сучасним менеджерам необхідні навички використання AI-driven dashboards, предикативної аналітики і систем оптимізації ресурсів.

Одночасно змінюються вимоги до навичок комунікації в гібридних командах. У командах, де частину функцій виконують системи ШІ, зростає значення комунікативної гнучкості, прозорості рішень і здатності пояснювати технологічні процеси мовою алгоритмів. Менеджер має виступати «перекладачем» між людським і алгоритмічним рівнем комунікації.

Таблиця 2

Еволюція компетенцій менеджера IT-проєкту в умовах застосування ШІ

Група компетенцій	До впровадження ШІ	Після впровадження ШІ
Hard skills		
Технічна грамотність	Базові знання офісних і проєктних інструментів (MS Project, Jira, Trello)	Знання інструментів ШІ, Data Analytics, ML-платформ, автоматизації бізнес-процесів
Управління даними	Збір і аналіз звітів вручну	Використання інтелектуальних систем для аналітики, прогнозування ризиків, автоматизації звітності
Планування та контроль	Планування на основі досвіду й історичних даних	Використання AI-помічників для прогнозування строків, ресурсів і бюджетів
Кібербезпека та етика	Мінімальні знання з безпеки інформації	Розуміння принципів етичного використання даних, кіберзагроз
Soft skills		
Комунікація	Координація між членами команди	Взаємодія у змішаних командах «людина–ШІ», пояснення рішень, прозорість процесів
Лідерство	Орієнтація на завдання	Орієнтація на розвиток людського потенціалу, фасилітація інновацій
Критичне мислення	Прийняття рішень на основі досвіду	Оцінка достовірності рекомендацій ШІ, балансування між автоматизацією та людським судженням
Емоційний інтелект	Підтримка командної роботи	Управління змінами, мотивація команди в умовах автоматизації
Креативність та адаптивність	Обмежена інноваційність	Висока креативність, гнучкість до нових цифрових інструментів і технологій
Навчання протягом життя	Підвищення кваліфікації періодично	Безперервне оновлення знань у сфері ШІ, аналітики, етики даних

У статті **(Kozhakhmetova A., 2024)** авторка підкреслює, що інтеграція ШІ трансформує традиційну роль менеджера проєкту, зміщуючи акцент від адміністративних функцій до аналітичних та стратегічних компетенцій. Також зростає етична відповідальність за використання ШІ. Оскільки алгоритми не позбавлені помилок, менеджер має оцінювати достовірність і логічність

результатів, запропонованих ШІ. Порівняльний аналіз компетенцій менеджера ІТ-проєкту до і після впровадження ШІ надано у табл.2.

Менеджер має оцінювати достовірність і логічність результатів ШІ, усвідомлювати соціальні наслідки їх використання. Етична відповідальність передбачає уникнення дискримінаційних рішень ШІ та забезпечення прозорості процесів. Ті навички, які не піддаються автоматизації — емпатія, здатність мотивувати команду, креативність у пошуку нестандартних рішень — стають вирішальними. Менеджери з високим емоційним інтелектом ефективніше інтегрують ШІ у командну динаміку, підтримуючи довіру та продуктивність. Все це потребує змін у підготовці кадрів для ІТ галузі. Освітні програми мають включати дисципліни з аналітики даних, основ ШІ, цифрової етики, управління змішаними командами та розвитку креативного інтелекту.

Наукова новизна розробки складається в удосконалені корпоративних стандартів компетенцій проектних менеджерів, що враховують рівень цифрової грамотності й адаптивності до роботи з ШІ.

Висновки. Поширення штучного інтелекту зумовило глибоку трансформацію професійних компетентностей менеджера ІТ-проєкту. Основні тенденції полягають у переході від контролю до аналітики, від технічної спеціалізації — до стратегічного мислення, від формального лідерства — до фасилітаційного управління людьми та технологіями. Hard skills розширюються за рахунок знань у сфері ШІ, аналітики даних і кібернетики, тоді як soft skills набувають більшої ваги, оскільки саме вони забезпечують ефективну інтеграцію людини й алгоритму в єдину систему управління. Це дозволить готувати фахівців, здатних адаптуватися до гібридного середовища управління проєктами.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення **інтегрованої моделі компетентностей менеджера ІТ-проєкту** в умовах гібридного управління, що поєднує когнітивні, етичні та технологічні аспекти професійної діяльності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Fridgeirsson T. V., Ingason H. T., Jonasson H. I., Jonsdottir H. I. An authoritative study on the near future effect of artificial intelligence on project management knowledge areas // *Sustainability.* – 2021. – Vol. 13, No. 4. – P. 2345. – DOI: 10.3390/su13042345.
2. Taboada I., Daneshpajouh A., Toledo N., De Vass T. Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review // *Applied Sciences.* – 2023. – Vol. 13, No. 8. – P. 5014. – DOI: 10.3390/app13085014.
3. Castro M., Gonçalves P., Silva M. Do the Project Manager's Soft Skills Matter? Impacts of the Project Manager's Emotional Intelligence and Trustworthiness on Project Success // *Administrative Sciences.* – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 141. – DOI: 10.3390/admsci12040141.
4. Когут І. В. Актуальні менеджерські компетенції фахівців з проєктного менеджменту для галузі інформаційних технологій // *Підприємництво та інновації.* – 2023. – Вип. 23(12). – DOI: 10.37320/2415-3583/23.12.

5. Кубявка Л. Б., Латишева Т. В. Концепція побудови і принципи управління проєктного та продуктового IT-менеджменту // *Управління розвитком складних систем.* – 2024. – Вип. 57. – С. 45–50. – DOI: 10.32347/2412-9933.2024.57.45-50.
6. Бачинський О. Використання штучного інтелекту як інструменту управління проєктами // *Економіка та суспільство.* – 2024. Вип. 61. С. 18. – DOI: 10.32782/2524-0072/2024-61-18.
7. Kozhakhmetova A. Assessing the impact of artificial intelligence on project management // *Knowledge and Performance Management.* – 2024. – Vol. 8(2). – P. 91–102. – DOI: 10.21511/kpm.08(2).2024.09.
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). – 6th ed. – USA: Project Management Institute, 2017. – 756 p.
9. The Standard for Project Management and a Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). – 7th ed. – USA: Project Management Institute, 2021. – 250 p.
10. IPMA "Individual Competence Baseline" (ICB) Version 4.0 for Project, Programme & Portfolio Management [Електронний ресурс]. – IPMA, 2015. – 431 p. – Режим доступу: https://products.ipma.world/ipma-product/icb/read-icb/.

УДК 004.056:004.94

О.М. Алексєєв[1], А.С. Абрамов[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РОЗРОБКА КОНВЕРТОРА ГРАФІВ ЗНАНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Досліджено процес перетворення файлів даних з одного формату на інший формат. Розроблено онлайн конвертор для перетворення графів знань різного обсягу з формату представлення W3C Turtle в формат N-Triples. Проведено тестування Розроблена програма-конвертер документів дозволяє перетворювати різні версії документів на інші формати для довгострокового зберігання або внутрішні документи для розміщення на клієнтських сайтах.

Ключові слова: *графи знань, триплет, суб'єкт, предикат, об'єкт, правила конвертації, векторизація, семантичний штучний інтелект, нейромережевий штучний інтелект.*

Вступ. Серед форматів представлення знань особливе місце займають так звані графи знань, цей формат також часто використовується для побудови онтологій. Це пояснюється як історичними причинами, так і поточною ситуацією на ринку систем штучного інтелекту. Наприклад графами знань для збереження та розповсюдження користується вікіпедія та інші відкриті джерела інформації. Серед графів знань популярними є формати розроблені консорціумом W3C зокрема формат Turtle, однак, використовувати графи знань у вигляді Turtle для машинного навчання незручно.

Зазвичай формати представлення знань оптимізують з метою зменшення обсягу файлів та покращення читабельності людиною тощо. Для представлення

знань різних форматів у джерело даних для навчання нейронних мереж потрібні додаткові перетворення у такий формат який було б зручно перевести у числову форму і використати у машинному або глибокому навчанні. Таким чином, це дослідження спрямоване на розробку конвертора, який перетворює графи знань Turtle у більш формалізований вигляд, який набагато краще підходить для подальшої векторизації та навчання систем штучного інтелекту.

Постановка задачі. Штучний інтелект заснований на нейронних мережах (Neural AI) за допомогою численних математичних перетворень здатен знаходити складні взаємні залежності між даними, однак через те що для обробки нейромережами дані мусять бути позбавлені сенсу семантичний зв’язок між елементами предметної області може бути спотворений. Таким чином існує потреба об’єднати ці дві частини штучного інтелекту аби підсилити найкращі риси цих двох різновидів штучного інтелекту задля отримання як найкращого результату.

Для цього необхідно удосконалити технологію створення інструменту, що реалізує механізми конвертацію графу у формат N-Triples та можливість завантажити сформований файл по посиланню, що підвищує ефективність розробок штучного інтелекту.

Основний зміст роботи. На основі аналізу систем представлення знань визначені вимоги до систем знань, які точно відображають реальні концепції та взаємозв'язки, які повинні з більшою ймовірністю даватиме точні результати і робитиме правильні прогнози.

На основі детального аналізу текстових форматів, призначених для збереження знань, багато більшість з яких є не дуже зручними для машинного навчання, формат N-Triples є більш формалізованим і зручнішим для векторизації і подальшого машинного навчання.

Формат RDF/Turtle, в якому опис співвідношення суб’єкт-предикат-об’єкт виконується шляхом форматування, що позбавляє його зайвого синтаксису. Цей формат здатен опрацювувати різні простори імен, здатен включати в себе коментарі і є доволі зручним та читабельним. проте деякі спрощення задля читабельності не дають змоги використовувати цей формат в задач автоматизованого тестування або машинного навчання у чистому вигляді.

Формат RDF/N-Triples є підвидом попереднього, але таким, що має більш суворий та формалізований синтаксис призначений для систем автоматизованого тестування. У порівнянні з попереднім форматом може мати відносно більший обсяг бо його синтаксис не передбачає просторів імен що робить файл більш читабельним та меншим за розміром.

Розроблюване програмне забезпечення є веб-застосунком, архітектура якого наведена на рисунку 1.

Веб-застосунок складається з наступних компонентів:

- Клієнт: під клієнтом мається на увазі веб-браузер на боці користувача котрий здійснює HTTP запити до сервера.

- Сервер: це хмарне середовище де буде розгорнуто такі компоненти застосунку як: веб-сервер, сервер застосунків Gunicorn, FastAPI застосунок та модуль конвертора.
- Веб-Сервер: це програма яка запускається на сервері та приймає HTTP запити від клієнтів.
- Сервер застосунків Gunicorn: це WSGI HTTP сервер для застосунків створених мовою Python який може створювати декілька робочих процесів для обслуговування запитів від користувачів.
- FastAPI застосунок: це застосунок розроблений мовою програмування Python з використанням фреймворку FastAPI який оброблює запити від серверу застосунків згідно описаній логіці та формує відповідь яку надсилає на сервер застосунків.
- Модуль конвертора: це програмне забезпечення розроблене мовою програмування Python яке виконує логіку перетворення граматики Turtle у N-Triples.

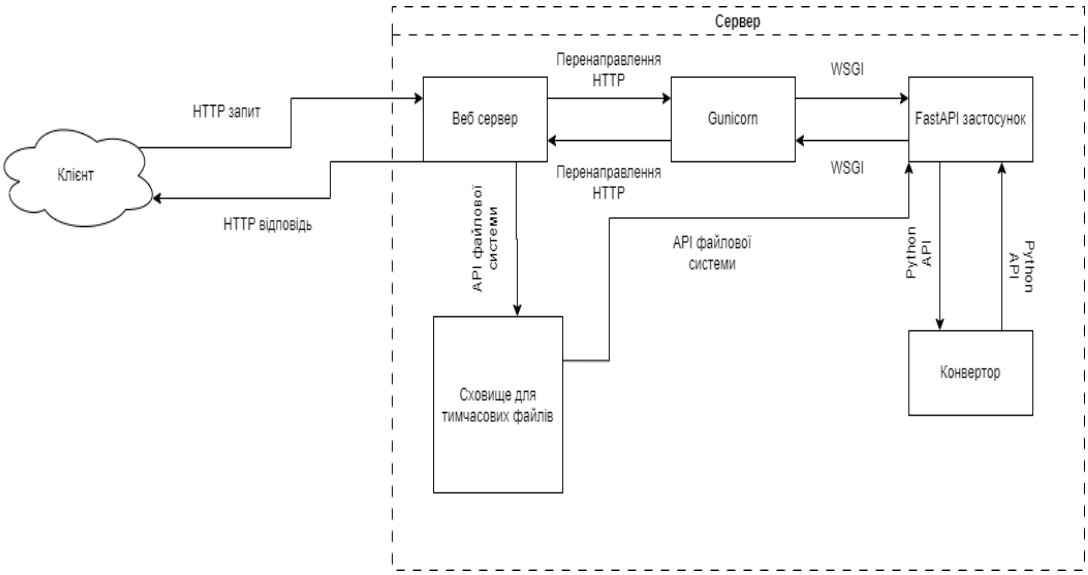


Рис. 1 Архітектура застосунку конвертора графів знань

Розроблений застосунок надає зрозумілий інтерфейс у вигляді веб-сторінки з формою для завантаження файлу, швидку конвертацію графу у формат N-Triples, та можливість завантажити сформований файл по посиланню. Веб-застосунок має практичне впровадження, оскільки надає вирішення проблемі з якою стикаються розробники ШІ.

Розроблюваний конвертор розрахований на те що користувач наддасть файл графу знань для перетворення. Тому застосунок забезпечує завантаження файлу на сервер та передачу його на обробку модулю конвертора при цьому виклик модуля конвертора має виконуватись для кожного потоку веб сервера окремо клієнт за допомогою POST запиту завантажує файл на веб сервер, файл опиняється у тимчасовому каталозі для завантажених файлів а інформація про нього потрапляє у FastAPI застосунок що функціонує під керуванням сервера

застосунків Gunicorn конвертор виконує перетворення графу знань зберігає його у новий тимчасовий файл та повертає користувачу сторінку з посиланням на сформований файл.

Наукова новизна роботи полягає у створенні застосунка, який надає інтерфейс у вигляді веб-сторінки з формою для завантаження файлу, швидку конвертацію графу у формат N-Triples, та можливість завантажити сформований файл по посиланню, що підвищує ефективність розробок штучного інтелекту

Розроблена програма-конвертер документів може застосовуватися користувачами для створення різних версій контенту відповідно до потреб підприємства. Програма-конвертер документів дозволяє перетворювати різні версії документів на інші формати для довгострокового зберігання або внутрішні документи для розміщення на клієнтських сайтах, може бути використана для розробці засобів машинного навчання для систем штучного інтелекту.

Висновки. У роботі проведено аналіз текстових форматів призначених для збереження знань при машинному навчанні, визначено основні вимоги до них. Обґрунтовано вибір формату N-Triples, який є більш формалізованим і зручнішим для векторизації і подальшого машинного навчання. Розроблено та протестовано програму-конвертер документів, яка може застосовуватися користувачами для створення різних версій контенту відповідно до потреб підприємства. Програма-конвертер документів дозволяє перетворювати різні версії документів на інші формати для довгострокового зберігання або внутрішні документи для розміщення на клієнтських сайтах, може бути використана для розробці засобів машинного навчання для систем штучного інтелекту. Проведені дослідження підтвердили ефективність використання розробленого застосунку, який надає зрозумілий інтерфейс у вигляді веб-сторінки з формою для завантаження файлу, швидку конвертацію графу у формат N-Triples, та можливість завантажити сформований файл по посиланню. Розроблений застосунок надає зрозумілий інтерфейс у вигляді веб-сторінки з формою для завантаження файлу, швидку конвертацію графу у формат N-Triples, та можливість завантажити сформований файл по посиланню.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. W3C. RDF 1.1 N-Triples: A line-based syntax for an RDF graph [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.w3.org/TR/n-triples/ (дата звернення: 07.11.2025).
2. Sack, H. RDF Turtle Serialization [Електронний ресурс] // Zenodo. – 2023. – Режим доступу: https://zenodo.org/records/10043736/files/2.3_RDF_Turtle_Serialization-2.pdf (дата звернення: 07.11.2025).
3. RDF serializations and triplestores [Електронний ресурс] // Vanderbilt Libraries Digital Lab. – Режим доступу: https://heardlibrary.github.io/digital-scholarship/lod/serialization/ (дата звернення: 07.11.2025).

UDC 519.8

Danylo Lubenets[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

POST-OPTIMIZATION ANALYSIS AND STREAMLINING OF MATERIAL FLOWS IN HIERARCHICAL TRANSPORT SYSTEMS

Abstract. The study presents an approach to modeling and optimizing two-stage transport and logistics systems incorporating intermediate collection and distribution centers. A numerical algorithm combining the principles of multiplex territorial partitioning. The developed model accounts for overlapping service zones, providing greater flexibility and resilience of the logistics network under variable operational conditions.

Keywords*: two-stage logistics, intermediate distribution center, multiplex partitioning, flow optimization, potential method, transportation costs.*

Introduction. The research focuses on two-stage processes of material flow redistribution that occur within transport and logistics systems composed of resource collection centers located across a defined territory (first-stage nodes) and final delivery centers (second-stage nodes). Each first-stage center serves a specific territorial area. In [1], mathematical models of two-stage location–allocation problems are presented, assuming non-overlapping service zones. However, in real-world logistics, technical, organizational, or spatial constraints may prevent some centers from fully collecting resources within their assigned areas. In such cases, part of the flow may be redirected through nearby centers.

This study addresses the problem of determining the optimal placement of intermediate logistics centers, the configuration of their service zones, and the subsequent redistribution and delivery of collected resources to final destinations under the criterion of minimizing total transportation and organizational costs. Unlike classical formulations, the proposed approach allows multiple overlapping service zones.

Similar two-level logistics networks with intermediate hubs have been widely investigated in recent studies, particularly in relation to integrated location–routing models [2]. These works emphasize the relevance of approaches that consider interstage flow dependencies and optimize resource transfers between hierarchical levels. Practical applications of such models include the organization of agricultural product collection and transportation from farms to grain storage facilities and further to processing plants [3], as well as the design of waste collection and sorting station networks aimed at reducing unit transportation costs [4]. Comparable two-stage logistics processes are also characteristic of evacuation planning in areas affected by emergencies.

Problem statement. The modeling of the described processes is based on a set of assumptions that define the initial parameters and constraints of the logistics system:

- intermediate logistics centers function as nodes for collecting and redistributing resources within designated territorial areas. The costs of their construction, maintenance, and operation are assumed to be known and constant throughout the analyzed period;
- the cost of establishing second-stage centers is considered fixed and identical for all facilities;
- distances between intermediate centers, collection points, and final delivery centers are predetermined and remain unchanged over time;
- final logistics centers can accumulate resources from multiple intermediate nodes. Each intermediate point serves a defined part of the territory, while it is assumed that resources from any given location can be transported to a final destination through one of the k nearest intermediate centers. This assumption enhances the flexibility and reliability of the supply chain in the presence of disruptions or capacity constraints;
- the spatial distribution of resources within the studied area is represented analytically or considered uniform;
- all resources accumulated at intermediate distribution centers must be fully transported to their final destinations.

Based on these premises, the study aims to:

- develop an optimal multiplex partitioning scheme of the service area that allows overlapping zones and ensures continuity of supply in case of local inaccessibility [5]
- formalize a two-stage resource distribution process, incorporating sequential collection, accumulation, and delivery stages
- determine the optimal placement of intermediate distribution centers to minimize total transportation and organizational costs.

Main content of the study. The developed numerical algorithm for optimizing the two-stage distribution of material flows in a transport and logistics system is aimed at determining the most efficient locations for intermediate centers and forming an optimal flow structure between the hierarchical stages. The proposed approach relies on the concept of multiplex territorial partitioning that allows overlapping service zones, thereby enhancing the reliability and flexibility of the logistics network [6].

Within the proposed framework, the problem is formulated as an optimization task in which the service area is represented as a system of subsets forming a multiplex coverage. Each subset corresponds to a specific logistics center, and its participation in the overall system is described by a characteristic function that determines the degree to which a point in space belongs to that center's service zone.

The application of duality theory makes it possible to transform the spatial representation of the problem into an analytical form, in which the characteristic functions depend on a set of parameters. These parameters are determined by solving an auxiliary finite-dimensional nonsmooth optimization problem, where the objective function accounts for total system costs, including transportation, organizational, and

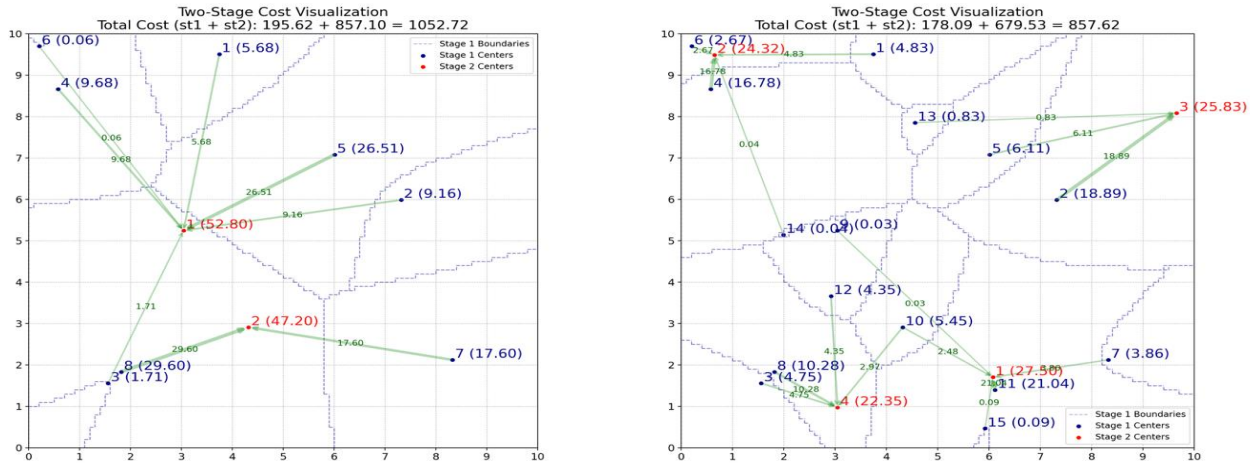
operational factors. To find the optimal parameters, the Shor's r-algorithm is used, as it is particularly effective in handling complex nonsmooth optimization problems with multiple local minima.

Once the optimal characteristic functions are obtained, service zones are assigned to each intermediate center, taking into account multiple overlapping possibilities up to *k* times. This allows the creation of redundant supply routes and enhances the resilience of the logistics network. As a result, each first-stage center is assigned a service area, while certain regions may be shared by several centers simultaneously.

At the next stage, the potential method is applied to determine the optimal flows between the first- and second-stage centers, yielding the least-cost transportation configuration under the constraints of center capacities. Consequently, the optimal flow magnitudes are calculated, ensuring cost minimization while maintaining efficient resource delivery.

The results of computational experiments are illustrated through a visual representation of the two-stage resource distribution process, where resources are uniformly distributed across the studied area. Figure 1 presents an example of optimal placement of *N* intermediate collection centers and *M* final destination centers, showing the amount of resources collected and the corresponding flows directed toward the second-stage centers.

The modeling outcomes confirm the effectiveness of the multiplex partitioning approach for location–allocation problems. It was shown that this method contributes to reducing the average transport distance, balancing network utilization, and increasing system resilience to changing operational conditions. Even in complex topologies, the proposed algorithm ensures stable flow management and a noticeable reduction in the total cost of the logistics system.



a) N = 8, M = 2 b) N = 15, M = 4

Fig. 1. Visualization of the results of optimal resource flow distribution with N intermediate centers and M second-stage centers

After obtaining the initial distribution of resource flows, an additional post-processing procedure is applied to refine the network topology. This stage involves the identification and removal of intermediate centers whose throughput capacity is below a defined efficiency threshold (see Fig. 1(b), centers 5, 8, 12, 13, and 14). The resources previously assigned to these centers are redistributed among the nearest active nodes, which reduces redundant transportation links and improves overall network coherence. As a result of this secondary optimization run, the logistics structure becomes more compact and cost-efficient. Figure 2 illustrates the configuration of the optimized network after these adjustments, demonstrating a more balanced allocation of flows and a decrease transportation costs.

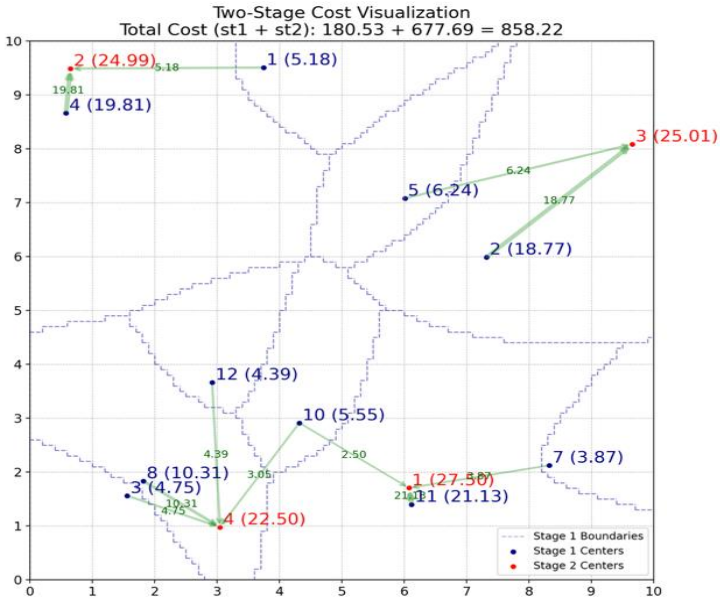


Fig. 2. Optimized network after excluding low-efficiency centers (N = 10, M = 4)

The scientific novelty lies in the development of a generalized two-stage material flow distribution model that allows multiple overlapping service zones and applies the multiplex partitioning method to determine the optimal placement of intermediate centers. This approach enhances system robustness and minimizes total costs under varying spatial accessibility conditions.

Conclusions. The analysis of computational experiments confirmed the effectiveness of the developed approach to optimizing the two-stage distribution of material flows within transport and logistics systems. The proposed algorithm ensures rational placement of intermediate distribution centers, minimizes transportation costs, and achieves a balanced allocation of flows between the system's stages.

This refinement is practically justified, as it increases the system's adaptability to demand fluctuations, improves the utilization of transportation resources, and contributes to forming a more efficient network topology. The obtained results can serve as a foundation for future research focused on incorporating temporal factors, developing multi-criteria optimization models, and applying geographic information systems (GIS) for automated modeling of logistics processes.

REFERENCES

1. Станіна О.Д., Ус С.А., Коряшкіна Л.С. Моделі та методи розв'язання задач оптимального розміщення двоетапного виробництва з неперервно розподіленим ресурсом: монографія. / Вид-ць «Свідлер А.Л.» – Дніпро, 2021. – 200 с.
2. Wang Y. Two-Echelon Location-Routing Problem with Time Windows and Transportation Resource Sharing (2E-LRPTWTRS). / Hindawi Publishing Corporation – London, 2021. – 15 p.
3. Yuniarti R., Masudin I., Rusdiansyah A., Handayani D.I. Model of multiperiod production-distribution for closed-loop supply chain considering carbon emission and traceability for agri-food products. / International Journal of Industrial Engineering and Operations Management – Vol. 5, No. 3. – 2023. – pp. 240–263.
4. Caramia M., Pinto D.M., Pizzari E., Stecca G. Clustering and routing in waste management: A two-stage optimisation approach. / EURO Journal on Transportation and Logistics – Vol. 12. – Elsevier, Amsterdam, 2023.
5. Коряшкіна Л.С., Лубенець Д.Є. Математичні моделі та методи мультиплексного розбиття і багатократного покриття множин для задач розміщення-розподілу. / Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security №4. 2023. С. 12–25.
6. Koriashkina L.S., Lubenets D.E., Minieiev O.S., Sazonova M.S. Mathematical foundations of methods for solving continuous problems of optimal multiplex partitioning of sets. / Radio Electronics, Computer Science, Control – No. 2. – 2025. – pp. 68–83.

УДК 004.91

Д.В. Іванов[1], Р.М. Полішко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ПАРСИНГУ ВЕБ-ДАНИХ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Описано сучасну методологію інтелектуального парсингу, яка забезпечує ефективний збір структурованих і неструктурованих даних із веб-ресурсів. Розглянуто архітектуру процесу, що охоплює етапи аналізу джерела даних, вибору інструментів, побудови правил вилучення, семантичного аналізу, обробки виключних ситуацій і збереження результатів у форматах, придатних для подальшої аналітики. Запропоновано підхід до поєднання традиційних алгоритмів парсингу (BeautifulSoup, Scrapy, Selenium) із методами обробки природної мови та машинного навчання. Наведено приклади практичного використання для автоматизованого моніторингу інформаційних веб-ресурсів.

***Ключові слова**: парсинг, веб-скрейпінг, структуровані дані, неструктуровані дані, NLP, машинне навчання, Selenium, автоматизація збору даних, інформаційні систем.*

Вступ. Сучасний цифровий простір характеризується стрімким зростанням обсягів відкритих даних, доступних через веб-ресурси. Ці дані мають вагоме значення для наукових, аналітичних і практичних задач – від моніторингу економічних тенденцій до виявлення інформаційних патернів у соціальних мережах.

Разом із цим, зростає складність структури веб-сайтів: застосування JavaScript-рендерингу, динамічне завантаження контенту, політики доступу та CAPTCHA ускладнюють процес автоматизованого збору даних.

Для вирішення цих проблем виникає необхідність створення інтелектуальних систем парсингу, здатних не лише вилучати дані, але й аналізувати їхню семантику, адаптуватися до змін структури сторінок і забезпечувати правомірність використання отриманої інформації.

Постановка задачі. Метою роботи є розроблення методології інтелектуального парсингу веб-даних, що поєднує технічні засоби вилучення інформації з аналітичними інструментами обробки текстів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- здійснити аналіз сучасних підходів до веб-скрейпінгу та їхніх обмежень;
- побудувати багаторівневу архітектуру процесу збору даних;
- розробити методи попередньої фільтрації та семантичного аналізу контенту;
- перевірити ефективність методології на прикладі експериментальної системи збору даних.

Основний зміст роботи. У дослідженні застосовано гібридний підхід, що об’єднує класичні алгоритми парсингу з інтелектуальними технологіями обробки природної мови (NLP) та машинного навчання.

Методологія парсингу складається з таких основних етапів (рис. 1):

1. аналіз джерела даних: визначення структури сторінки, частоти оновлення, політики доступу, способу завантаження контенту (статичний або динамічний);
2. збір HTML-контенту: для статичних сайтів використовується requests, httpx, для динамічних – Selenium, Playwright, Puppeteer;
3. попередня обробка: видалення нерелевантних елементів (скриптів, стилів, реклами);
4. парсинг структурованих даних: застосування XPath, CSS-селекторів, бібліотек BeautifulSoup, lxml;
5. обробка неструктурованих текстів: використання NLP-інструментів (spaCy, NLTK, Stanza) для токенізації, лематизації, розпізнавання іменованих сутностей (NER);
6. збереження даних: структуровані результати серіалізуються у форматах JSON, CSV або зберігаються у базах даних (PostgreSQL, MongoDB).

Особливістю методології є впровадження етапу семантичного парсингу, який дозволяє інтерпретувати зміст текстових фрагментів. Застосування моделей трансформерного типу (BERT, GPT, RoBERTa) забезпечує автоматичне виділення категорій текстів і виявлення ключових понять. Це підвищує точність та релевантність зібраних даних.

Архітектура розробленої системи інтелектуального парсингу побудована за модульним принципом і включає три основні рівні: збір даних, інтелектуальну

обробку та збереження результатів. Такий підхід забезпечує масштабованість системи, спрощує оновлення окремих компонентів і дає змогу адаптувати її під різні типи веб-ресурсів. На рівні збору даних функціонує модуль керування запитами, який формує черги URL-адрес, здійснює перевірку доступності ресурсів, а також оптимізує частоту звернень до серверів. Для уникнення блокувань застосовується система ротації проксі-серверів та емульованих заголовків браузера (user-agent rotation).

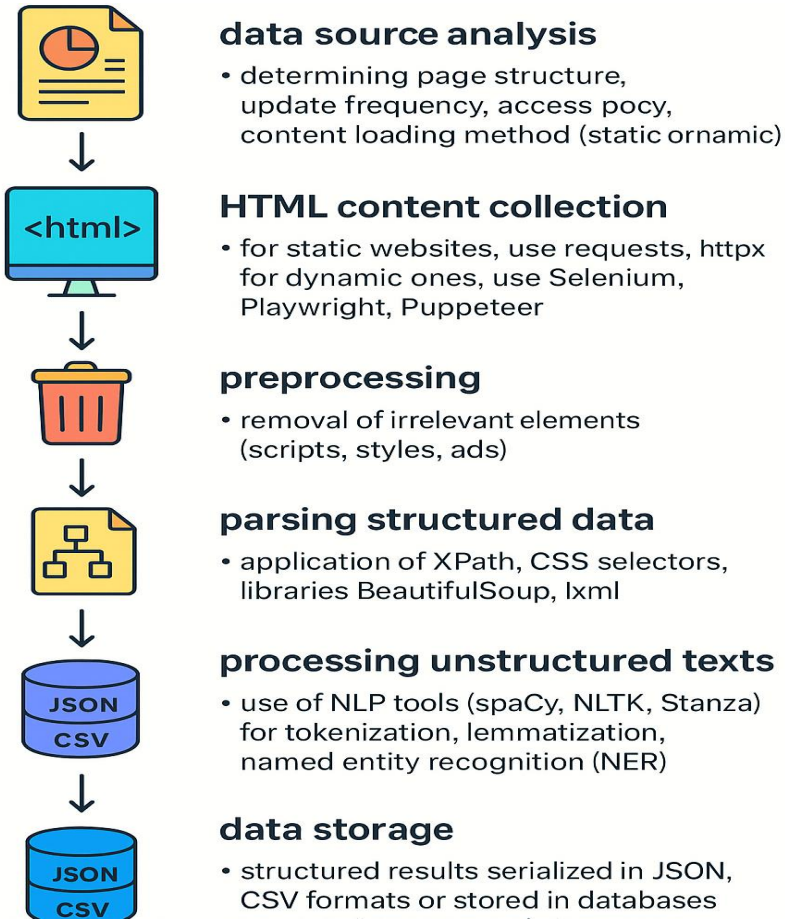


Рис. 1. Етапи методології парсингу

Інтелектуальний рівень відповідає за попередній аналіз структури сторінки, автоматичне визначення логічних блоків контенту та класифікацію текстових фрагментів. Для цього використовуються алгоритми комп’ютерного зору (визначення DOM-патернів) у поєднанні з векторними моделями представлення текстів (Word2Vec, fastText, BERT-ембедінги). Такий підхід дозволяє системі навчатися на прикладах і підлаштовуватися під різноманітні структури веб-документів без ручного налаштування селекторів.

Ключовою перевагою методології є здатність до самоадаптації – система аналізує помилки попередніх ітерацій парсингу, формує зворотний зв’язок і коригує параметри вилучення. Це реалізовано через модуль Feedback Learning,

який накопичує дані про невдалі запити або пропущені сутності та використовує їх для подальшого вдосконалення моделі класифікації контенту. Таким чином забезпечується поступове підвищення точності без ручного втручання розробника.

На етапі обробки контенту реалізовано семантичний аналіз текстів, що дозволяє виокремлювати ключові терміни, тематику документа та контекстні зв'язки між сутностями. Наприклад, при обробці новинних повідомлень система здатна автоматично розпізнавати географічні назви, персоналії, часові позначення та категоризувати матеріал за напрямами («економіка», «технології», «екологія» тощо). Для цього використано моделі послідовного маркування (sequence labeling) на основі архітектур BiLSTM-CRF та трансформерів.

З метою підвищення якісної оцінки вилучених даних реалізовано процедуру валідації результатів за допомогою зовнішніх джерел. Наприклад, для перевірки достовірності числових показників система здійснює крос-перевірку з відкритими наборами даних або API державних статистичних сервісів. Це зменшує кількість хибно позитивних результатів і підвищує рівень довіри до отриманих даних.

Зберігання результатів парсингу реалізовано у вигляді гібридної системи даних: структуровані дані зберігаються в реляційній базі (PostgreSQL), тоді як неструктуровані – у вигляді JSON-документів у MongoDB. Такий підхід забезпечує ефективний пошук, індексацію й подальшу інтеграцію з аналітичними інструментами (Power BI, Tableau, Grafana). Крім того, передбачено REST API для доступу до зібраних даних, що робить систему придатною для використання в зовнішніх застосунках.

У межах дослідження проведено експериментальне тестування методології на кількох наборах веб-даних різного типу:

1. Архівні погодні дані (структуровані показники температури, вологості, тиску).
2. Новинні стрічки інформаційних агентств (напівструктурований контент).
3. Соціальні медіа (нестабільна структура, динамічний контент).

Результати експериментів показали, що використання NLP-моделей під час семантичного аналізу знижує кількість пропущених даних у середньому на 12–15% порівняно з класичними парсерами. При цьому середній час обробки сторінки зріс лише на 8%, що свідчить про доцільність інтеграції інтелектуальних модулів навіть у системи, де критичною є швидкість обробки.

Для оцінки ефективності запропонованої методології парсингу архівних даних про погоду використовується стандартна метрика точності (accuracy), що визначає співвідношення правильно витягнутих погодних параметрів до загальної кількості очікуваних параметрів, що обчислюється за формулою:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (1)$$

де TP (True Positives) – кількість істинно позитивних випадків, що належать до позитивного класу (наприклад, температура, вологість, атмосферний тиск);

TN (True Negatives) – кількість істинно негативних випадків, що належать до негативного класу;

FP (False Positives) – кількість хибно позитивних випадків;

FN (False Negatives) – кількість хибно негативних випадків, тобто кількість даних, що мали бути витягнуті, але були пропущені парсером.

Крім того, для комплексної оцінки застосовуються:

- Precision (прецизійність):

$$Precision = \frac{|TP|}{|TP| + |FP|}, \quad (2)$$

- F1-міра:

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot \text{Accuracy}}{Precision + \text{Accuracy}}, \quad (3)$$

Результати тестування:

1. точність (Accuracy) – 95%;
2. прецизійність (Precision) – 97,9%;
3. F1-міра – 96,4%.

Отримані результати свідчать про стабільність і високу якість роботи системи навіть за умов динамічного оновлення контенту.

Особливу увагу приділено етичним аспектам парсингу. Всі запити до веб-ресурсів здійснюються з урахуванням вмісту файлу robots.txt і політики конфіденційності сайту. Для мінімізації навантаження на сервери впроваджено механізм тайм-аутів між зверненнями та обмеження кількості паралельних потоків. Крім того, у процесі тестування система здійснює анонімізацію даних користувачів, що можуть бути випадково вилучені під час збору контенту.

Перспективи застосування методології виходять за межі академічних досліджень. Вона може бути використана у створенні інформаційно-аналітичних платформ, систем моніторингу публікацій у ЗМІ, електронних бібліотек, а також у проєктах із відкритих даних (open data projects). Окремо варто відзначити можливість її використання в галузі екологічного моніторингу, де система може збирати текстові звіти про стан довкілля, автоматично аналізувати тенденції забруднення або зміни кліматичних показників.

Подальший розвиток методології передбачає впровадження глибших моделей генеративного типу, здатних не лише витягати інформацію, а й формувати аналітичні звіти на її основі. У цьому контексті перспективним є застосування моделей GPT-подібного типу для автоматичної інтерпретації даних і побудови текстових підсумків (data summarization). Також планується розширення функціональності за рахунок інтеграції модуля візуального парсингу, що дає змогу розпізнавати інформацію з інфографіки та таблиць, представлених у графічній формі (через OCR-технології та комп'ютерний зір).

Таким чином, розроблена методологія поєднує технічну гнучкість, інтелектуальну адаптивність і практичну придатність для реальних умов використання. Її комплексна архітектура забезпечує можливість масштабування, інтеграції з іншими аналітичними системами та дотримання принципів етичного збору даних у цифровому середовищі.

Наукова новизна полягає у формуванні та практичній реалізації методології інтелектуального парсингу веб-даних, що поєднує класичні алгоритми вилучення структурованої інформації з методами семантичного аналізу неструктурованих текстів.

Висновки. Проведене дослідження дало змогу обґрунтувати та реалізувати ефективну методологію інтелектуального парсингу веб-даних, що поєднує синтаксичні та семантичні методи обробки структурованої і неструктурованої інформації. Розроблена архітектура системи забезпечує адаптивність до змін структури веб-сайтів, стабільність роботи та високу точність отриманих результатів. Запропонований підхід дозволяє не лише автоматизувати процес збору даних, але й інтегрувати його в аналітичні та науково-дослідницькі системи, підвищуючи якість прийняття рішень на основі веб-інформації. Методологія може бути масштабована для широкого кола прикладних завдань, зокрема екологічного, соціального та економічного моніторингу, що робить її перспективним напрямом подальших досліджень у сфері інтелектуального аналізу даних.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pichiyan V., Muthulingam S., Sathar G., Sunanda N., Manmath N. Das. Web Scraping using Natural Language Processing: Exploiting Unstructured Text for Data Extraction and Analysis // Procedia Computer Science. 2023. Vol. 230. P. 193–202.
2. Su H., Kang R., Fan Y. Research on a Web System Data-Filling Method Based on Optical Character Recognition and Multi-Text Similarity // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, № 3. Art. 1034. DOI:10.3390/app14031034.
3. Barba G., Lazoi M., Lezzi M. Bibliometric Insights into Web Scraping and Advanced AI-Based Models for Valuable Business Data // SCIENCE & TECHNOLOGY Publications (SCITEPRESS). 2024. DOI: (doi not listed).
4. Maulidiyah S. J., Syahyadi A. I. Analysis of E-Commerce Product With Web Scraping Technique // CoreID. 2025. Vol. 3, No. 1 (March). P. 37–46.
5. Study on Web Scraping: Automating Data Extraction // Khan Z. F. // International Journal of Novel Research and Development. 2025. Vol. 10, Issue 4 (April). ISSN 2456-4184.

6. Borowiec M., Piszko R., Rak T. Knowledge Extraction and Discovery about Web System Based on the Benchmark Application of Online Stock Trading System // Sensors. 2023. Vol. 23, № 4, Art. 2274. DOI:10.3390/s23042274.
7. Combined use of web scraping and AI-based models for business applications: research evolution and future trends // Management Review Quarterly. 2025. DOI:10.1007/s11301-025-00551-3.
8. Web Scraping Tools and Techniques: A Brief Survey // Bale A. S. et al. // International Journal of Scientific Research and Engineering Development. 2025. Vol. 8, Issue 2 (Mar-Apr). ISSN 2581-7175.

УДК 669.14.017:621.785:004.942

М.О. Соболенко[1]
[1]ННІ ДМетІ Український Державний Університет науки і технологій, Дніпро, Україна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

Анотація. У роботі розглянуто актуальні проблеми впровадження інноваційних технологічних процесів термічної обробки металевих матеріалів. Розроблено режими процесу термічної обробки металу, призначені для застосування у виробництві високоміцних кріпильних виробів. Побудовано математичну модель технологічного процесу термічної обробки сталевої заготовки. Досліджено загальну математичну постановку задачі моделювання процесів теплопровідності із залученням розподіленої багатопроцесорної обчислювальної системи зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Робота містить узагальнення сучасних досліджень і практичних рекомендацій щодо покращення технологічних характеристик металопрокату.

Ключові слова: *математична модель, розподілена багатопроцесорна обчислювальна система, спеціалізоване програмне забезпечення, моделювання процесу теплопровідності.*

Вступ. У металургійному виробництві для підготовки гетерофазного сплаву до холодної деформації застосовують термічну обробку у вигляді сфероїдизуючого відпалювання, яка здійснюється у садових печах шахтного типу, або ковпакових. Недоліком вказаної термічної обробки (ТО) є значна її тривалість (кілька десятків годин). Крім цього, такій схемі ТО притаманні традиційні недоліки нагрівання металу зовнішнім теплоносієм [1].

Значне скорочення тривалості сфероїдизуючого відпалювання досягається завдяки застосуванню нагріву «внутрішнім» теплоносієм, тобто застосуванням електроконтактного або індукційного нагрівання оброблюваного металу. Але перспективні, з точки зору інтенсифікації процесу відпалювання, технології ТО потребують певної оптимізації з метою їх удосконалення та вимагають певних витрат, пов'язаних із проведенням натурних експериментів на лабораторному або дослідно – промисловому устаткуванні [2]. Тому для створення швидкісних процесів ТО виникає необхідність у проведені досліджень для розробки системи

контролю технологічних параметрів з використанням комп'ютерних програм і математичних моделей.

Постановка задачі. Розв'язування зазначених задач можливе тільки за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних комп'ютерних технологій [3], швидкодія яких дозволяє здійснити контроль технологічних параметрів у реальному режимі часу, завдяки чому забезпечуються умови ефективного керування технологічним процесом. Тому задача розробки новітніх металургійних технологій на основі використання багатопроцесорної обчислювальної системи є актуальною.

Основний зміст роботи. Вдосконалений технологічний процес термічної обробки сталі передбачає досягнення таких техніко-економічних переваг, як підвищена продуктивність, зниження енергоспоживання та поліпшення експлуатаційних властивостей готових виробів. Зазначених результатів досягнуто завдяки впровадженню розподіленої багатопроцесорної обчислювальної системи (РБОС), реалізованої у вигляді автономного модульного пристрою. Використання спеціалізованого програмного забезпечення забезпечує можливість автоматизованого задання, моніторингу та коригування температурних режимів по всій площині поперечного перерізу зразка під час нагрівання та витримки металу.

Основою побудови математичної постановки задачі моделювання процесу ТО у системі РБОС є рівняння теплопровідності з крайовими умовами, які визначають, що температура в області осі циліндра протягом усього процесу теплообміну залишається скінченною [4]. Розв'язання встановленої задачі здійснюється із застосуванням методу розщеплення операторів, суть якого полягає у редукції складного оператора до системи простіших одномірних рівнянь, що дозволяє інтегрувати їх послідовно.

Слід зазначити, що задача керування (аналогічно до задачі синтезу) у точній постановці належить до класу обернених задач, оскільки передбачає визначення керуючих функціональних параметрів на основі заздалегідь заданого результату – необхідного температурного профілю. Процес розв'язання реалізується у два етапи:

– Відокремлення мінімуму нев'язки.

– Визначення мінімуму шуканої функції керування в межах виділеного інтервалу.

Оскільки математична модель застосовується на всіх етапах термічної обробки металу, результати чисельного моделювання стосуються, зокрема, циклу первинного нагрівання. Основна проблема моделювання полягає в необхідності забезпечення достатньої точності й стійкості обчислень, що вимагає використання щільної розрахункової сітки з великою кількістю вузлів та виконання значної кількості ітерацій. Тому оптимальним рішенням є застосування розподілених багатопроцесорних систем, що й було реалізовано в рамках удосконалення технологічного процесу термічної обробки довгомірних сталевих виробів.

Відповідно до результатів теплофізичного експерименту побудовано математичну модель процесу, яка розглядається як задача оптимального керування. Таким чином, математичну модель доцільно трактувати як керовану систему, вхідні параметри якої задаються у вигляді вектору *R*. У нашому випадку компонентами цього вектору є коефіцієнти рівняння теплопровідності. Структура математичної моделі включає дві взаємопов'язані керовані підмоделі:

– температурну модель;

– потокову модель.

Застосування такого підходу забезпечує можливість виділення параметрів керування вектору *R*: у температурній моделі – це коефіцієнт температуропровідності, у потоковій – коефіцієнт теплопровідності.

Методологія розв'язування математичної моделі базується на побудові мінімізувальної послідовності значень функціонала:

$$J(R) = (T_e - T_p)^2,$$

де T_e, T_p – значення температури, відповідно отримані з експериментальних вимірювань і результатів чисельного розрахунку.

Наукова новизна. У такій постановці коефіцієнтну обернену задачу теплопровідності розв'язують як задачу оптимального керування, алгоритмічна реалізація якої виконана у розробленому програмно-прикладному пакеті (ППП).

Висновки. Розроблені програмно-алгоритмічні засоби орієнтовані на реалізацію комплексу функцій, пов'язаних із плануванням та проведенням теплофізичного експерименту, подальшою обробкою отриманих даних і формуванням необхідних аналітичних результатів. Закладені у ППП алгоритмічні структури характеризуються універсальністю, що забезпечує можливість їх адаптації до розв'язування інших типів обернених задач теплопровідності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі: пат. 143971. Україна: C21D 1/26. № u 2020 00940; заяв. 14.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16.
2. Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Соболенко М.О., Ткач М.О. Система автоматизованого контролю температурних режимів термічної обробки сталевого виробу. Металургійна та гірничорудна промисловість. № 1 (292), 2015, с. 142 – 146.
3. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., Moroz D. Model of Speed Spheroidization of Metal and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems. Springer. 2020. P. 33-41. (видання індексується в Scopus). Доступ: https://link.springer.com/charter/10.1007/987-981-15--10-0_4
4. G. Shlomchak, G. Shvachych, B. Moroz, E. Fedorov, D. Kozenkov Automated control of temperature regimes of alloyed steel product based on multiprocessors computing systems. Metalurgiya. № 58. (2019). 3 – 4. p. 299 – 302.

УДК 004.82:81’322

А.В. М’якенький[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОД РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ГЕНЕРАЦІЇ СЕМАНТИЧНИХ РЕПРЕЗЕНТАЦІЙ ТЕКСТІВ У МОВАХ З НЕВЕЛИКОЮ КІЛЬКІСТЮ РЕСУРСІВ

Анотація. У роботі досліджується проблема генерації семантичних репрезентацій текстів у мовах із низькою ресурсною базою на прикладі української мови. Особливу увагу приділено створенню AMR-графів, які є однією з найбільш універсальних і формально визначених моделей глибинної семантичної структури речення. Показано, що традиційні підходи до AMR-парсингу, орієнтовані переважно на англійську мову, демонструють значне зниження точності при перенесенні на інші мови через відсутність локальних AMR-корпусів, морфологічну складність та вільний порядок слів, характерні для української. У роботі обґрунтовується доцільність застосування методу Translate-and-Parse, який передбачає перенесення вхідного тексту у англомовний простір шляхом нейронного машинного перекладу, після чого формується AMR-граф за допомогою англомовного високоточного парсера. Показано, що сучасні моделі NMT здатні зберігати предикатно-аргументні залежності речення, що є критично важливим для коректної побудови AMR-структур. Наукова новизна дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні застосування підходу Translate-and-Parse для генерації AMR-репрезентацій у мовах з низькою кількістю ресурсів. Результати роботи формують підґрунтя для створення універсальних систем глибинного семантичного аналізу україномовних текстів і можуть бути використані для розв’язання широкого кола задач, зокрема ідентифікації перифраз, автоматичного узагальнення, семантичного пошуку та моделювання когнітивних процесів розуміння.

Ключові слова: *AMR, семантичний парсинг, мультимовні моделі, нейронний машинний переклад.*

Вступ. Сучасний етап розвитку обробки природної мови характеризується переходом від статистичних методів до глибинних нейронних моделей, здатних формувати контекстуальні семантичні представлення текстів. Однією з ключових тенденцій цього переходу стало прагнення до семантичного моделювання змісту висловлювань — тобто до створення таких формальних структур, які не просто відображають послідовність слів, а відтворюють глибинні смислові відношення між концептами, предикатами та аргументами. У цьому контексті особливе значення мають графові семантичні репрезентації, зокрема модель Abstract Meaning Representation, яка розглядається як універсальний інтерфейс між природною мовою та машинними системами розуміння.

Однак ефективність побудови AMR-графів безпосередньо залежить від наявності якісних анотованих корпусів, що слугують основою для навчання AMR-парсерів. Переважна більшість наявних корпусів створена для англійської мови, унаслідок чого більшість моделей AMR-парсингу мають архітектуру, що зосереджена на англійській мові, і демонструють значне зниження

продуктивності при застосуванні до інших мов. Ця проблема набуває особливої актуальності для мов із невеликою кількістю ресурсів, до яких належить і українська, оскільки для них відсутні великі корпуси, інструменти морфологічного аналізу та PropBank-анотації, що унеможливлює безпосереднє навчання AMR-парсерів.

Таким чином, проблема, що розглядається у даній роботі, полягає у пошуку ефективних методів генерації семантичних репрезентацій текстів українською мовою за відсутності власного анотованого AMR-корпусу. Для її розв'язання запропоновано інтеграцію систем нейронного перекладу в методи AMR-парсингу, що дозволяє формувати коректні англомовні еквіваленти речень і, відповідно, будувати адекватні AMR-графи за допомогою наявних англомовних парсерів. Такий підхід забезпечує збереження смислової структури висловлювань і відкриває можливості для масштабного використання AMR у дослідженнях української мови та інших низькоресурсних мов.

Постановка задачі. Метою дослідження є розроблення та обґрунтування гібридного підходу до генерації семантичних AMR-репрезентацій для україномовних текстів, який ґрунтується на поєднанні NMT-моделей та англомовних AMR-парсерів і забезпечує підвищення точності відтворення глибинної смислової структури речень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. проаналізувати сучасний стан проблеми мультимовного AMR-парсингу;
2. виявити обмеження наявних крослінгвальних парсерів при застосуванні до української мови;
3. оцінити якість сучасних моделей нейронного перекладу;
4. обґрунтувати вибір оптимальної NMT-моделі для інтеграції в методи генерації AMR;
5. порівняти точність генерації AMR-графів у запропонованому підході з результатами прямого мультимовного парсингу.

Основний зміст роботи. Завдання семантичного парсингу є одним із центральних у галузі обробки природної мови, оскільки воно забезпечує перехід від поверхневої синтаксичної структури речення до глибинного представлення смислу у формі графу. У межах цієї парадигми Abstract Meaning Representation посідає особливе місце як універсальний формат, що відображає значення висловлювання через набір концептів і семантичних відношень [1]. AMR-графи мають низку переваг - зокрема, вони абстрагуються від поверхневої граматики, що робить їх придатними для міжмовного застосування, та забезпечують уніфіковану основу для порівняння смислів, що критично важливо для задач парафразування, перекладу, узагальнення чи виявлення інформації.

Однак, попри свою універсальність, початковий розвиток AMR-парсингу був практично обмежений англійською мовою. Це зумовлено тим, що формування AMR-корпусів потребує трудомісткої ручної анотації, а також участі лінгвістів, знайомих із системою фреймів PropBank, на основі яких

описуються предикатно-аргументні структури. У результаті більшість високоточних AMR-парсерів орієнтовані саме на англомовні дані, тоді як для інших мов таких корпусів фактично не існує.

Зазначені обмеження зумовили формування окремої підгалузі досліджень - міжмовного або мультимовного AMR-парсингу. Її метою є розроблення таких методів, які дозволяють створювати AMR-графи для текстів цільовою мовою без безпосередньої анотації цією мовою, тобто шляхом перенесення семантичних знань з англійської. Подальший розвиток підходів до мультимовного AMR-парсингу відбувався у двох напрямах: створення AMR-анотацій відповідною мовою за зразком англійської та використання крослінгвальних нейронних моделей, які дозволяють переносити навчені представлення між мовами без ручного анотування [2].

Саме другий напрямок виявився найбільш перспективним, адже із появою багатомовних моделей стало можливим спільне представлення лексичних і семантичних ознак різних мов у єдиному векторному просторі. Це дало змогу створювати універсальні AMR-парсери, які, маючи навчання лише на англійських даних, здатні узагальнювати отримані закономірності для інших мов без додаткової розмітки. Основним предметом досліджень стала побудова архітектур на основі багатомовних трансформерів, які поєднують контекстуальні представлення різних мов у спільному просторовому базисі. Саме в цьому контексті було запропоновано архітектуру XL-AMR - першу повноцінну модель, здатну виконувати AMR-парсинг для десятків мов одночасно, використовуючи єдиний механізм попереднього навчання та узгодження семантичних просторів. XL-AMR стала фактичним стандартом для подальших досліджень у галузі мультимовного семантичного парсингу, визначивши нову парадигму — перенесення семантичної структури через багатомовні мовні моделі [3].

Основна ідея XL-AMR полягає у перенесенні знань із великого англомовного AMR-корпусу на цільові мови за допомогою багатомовних трансформерів, таких як mBERT. Ці моделі формують спільний латентний семантичний простір, у якому вектори представлень токенів різних мов наближаються один до одного на основі багатомовного контексту. Такий підхід забезпечує можливість генерації AMR-графів без потреби у прямій анотації даних для кожної окремої мови, що особливо важливо для мов із низьким рівнем ресурсної забезпеченості.

Архітектура XL-AMR реалізує двоетапний процес семантичного парсингу, у межах якого відбувається одночасне виявлення концептів і побудова між концептних зв’язків. Перший модуль - модуль ідентифікації концептів - ґрунтується на архітектурі послідовність-у-послідовність з енкодером і декодером, що моделюють послідовний перехід від вхідного тексту до лінеаризованої форми AMR-графа. Другий модуль - модуль ідентифікації відношень - відновлює структуру графових зв’язків між уже ідентифікованими концептами. Для цього застосовується класифікатор, який оцінює ймовірність наявності орієнтованого ребра між кожною парою вузлів і прогнозує його

семантичну мітку. Така модель забезпечує спільне навчання двох рівнів семантичного аналізу – лексико-семантичного (ідентифікація вузлів) і реляційного (побудова зв'язків), що сприяє цілісному відображенню змістової структури висловлювання.

Попри продуману систему багатомовного узгодження, точність XL-AMR при застосуванні до мов із високою морфологічною варіативністю залишається обмеженою. Експериментальні результати, опубліковані авторами моделі, засвідчують, що середній показник Smatch для англійської становить близько 84, тоді як для інших мов (німецької, італійської, іспанської, китайської) він коливається в межах 43–53.

З іншого боку, інші дослідження в галузі крослінгвального парсингу показали, що розвиток систем нейронного машинного перекладу (NMT) дозволяє досягати, а в багатьох випадках перевершувати результати прямих крослінгвальних AMR-парсерів. У низці робіт було продемонстровано, що поєднання перекладу та англомовного AMR-парсингу є значно результативнішим за пряме крослінгвальне моделювання [4]. Запропонований авторами підхід Translate-and-Parse ґрунтується на двоступеневому процесі: спочатку речення цільовою мовою автоматично перекладається англійською, після чого отриманий переклад подається на вхід високоточному AMR-парсеру, натренованому на великих англомовних корпусах.

Емпіричні дані засвідчили, що ефективність методу суттєво перевищує результати моделей безпосереднього крослінгвального парсингу, зокрема XL-AMR. За показником Smatch, що вимірює відповідність між згенерованими й еталонними AMR-графами, T+P демонструє значення в діапазоні 59.1–72.3 для багатьох європейських і азійських мов, тоді XL-AMR забезпечує лише 43–53.

Таким чином, нейронний машинний переклад перестає бути допоміжною процедурою й постає як повноцінний інструмент адаптації AMR-парсингу до мов, для яких відсутні власні AMR-корпуси. Це особливо важливо для української мови, яка належить до групи низькоресурсних і потребує методів, здатних забезпечити якісний семантичний аналіз без створення дорогих та трудомістких анотаційних ресурсів.

Для оцінки запропонованого підходу розглядалися три сучасні NMT-моделі, доступні для перекладу з української на англійську:

1. OPUS-MT – спеціалізовані трансформерні моделі, оптимізовані для низькоресурсних мов.
2. M2M-100 – багатомовна модель зі 100 мовами в обидві сторони.
3. NLLB-200 – масштабний трансформер від Meta, орієнтований на покриття 200 мов з акцентом на low-resource сегмент.

Оцінювання якості перекладу українсько-англійських моделей здійснювалося на тестовій множині Flores-200 [8]. Цей корпус є стандартом для крослінгвальної оцінки систем машинного перекладу та містить переклади на 200 мов зі збалансованим набором тематично нейтральних речень. Такий вибір

дозволяє об'єктивно порівнювати якість перекладу між моделями, не прив'язуючись до конкретного домену.

Оцінка моделей здійснювалася за ступенем збереження семантичної інформації за допомогою метрики BERTScore, яка порівнює переклад й еталон, використовуючи контекстуальні вектори, що згенеровані моделлю BERT [5]. Вона обчислюється за формулою (1) як середнє F1 значення між токенами двох речень у векторному просторі, що дає можливість вловлювати семантичну близькість навіть при лексичних відмінностях:

$$BERTScore = \frac{1}{|x|}\sum_{x_i \in x} max_{y_j \in y} cosine\left(f(x_i), f(y_j)\right), \quad (1)$$

де x_i, y_j – токени перекладу та референсу, f(·) - функція отримання векторного представлення. Діапазон значень функції змінюється від -1 до 1 та відображає семантичну близькість токенів.

Результати досліджень ефективності відкритих нейронних моделей перекладу українсько-англійської мови представлені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати оцінювання моделей перекладу

Модель	Клас / Архітектура	Розмір (млн параметрів)	BERTScore
OPUS-MT	Transformer (Helsinki-NLP)	390	0.93
M2M-100	Multilingual Many-to-Many (Meta)	615	0.94
NLLB-200	Transformer (Meta)	600	0.96

Застосування підходу Translate-and-Parse до задачі українсько-англійського перекладу показало, що модель OPUS-MT є найбільш збалансованим рішенням у контексті подальшої генерації AMR-графів. Хоча моделі M2M-100 та NLLB-200 в окремих випадках демонструють вищі значення BLEU, саме OPUS-MT характеризується найстабільнішим збереженням смислових залежностей, що підтверджується високими показниками семантичної метрики BERTScore. На відміну від більших багатомовних моделей, які інколи спричиняють надмірні синтаксичні трансформації або вводять лексичні зміщення, OPUS-MT відтворює аргументну структуру висловлювання більш послідовно, забезпечуючи мінімальну втрату семантичних відношень між предикатами та їх аргументами.

Отже, застосування методу Translate-and-Parse у поєднанні з моделлю OPUS-MT формує ефективну стратегію генерації AMR-репрезентацій для української мови. Орієнтація на семантичні метрики, зокрема BERTScore,

дозволяє здійснювати обґрунтований вибір NMT-моделі, яка найкраще зберігає смислові залежності в перекладі, що є ключовою передумовою для успішного AMR-парсингу україномовних текстів.

Висновки. У роботі досліджено проблему генерації семантичних репрезентацій текстів у мовах із низькою ресурсною базою на прикладі української мови та проаналізовано сучасні підходи до мультимовного AMR-парсингу. Показано, що традиційні методи прямого крослінгвального парсингу, зокрема XL-AMR, хоча й пропонують універсальний механізм перенесення знань між мовами, виявляються недостатньо ефективними у ситуаціях, коли для цільової мови відсутні паралельні AMR-корпуси або спостерігається складна морфологічна структура.

Було запропоновано підхід Translate-and-Parse, який продемонстрував здатність долати зазначені обмеження, оскільки переносить вхідний текст в англомовний простір, де AMR-парсери мають найвищу точність і навчальні дані. Проведений аналіз моделей NMT показав, що саме OPUS-MT забезпечує оптимальне співвідношення між якістю перекладу та стабільністю збереження семантичних залежностей, що робить її найбільш придатною для інтеграції в методи генерації AMR.

У перспективі отримані напрацювання можуть бути використані для створення мультимовних AMR-систем, у яких семантичні структури для різних мов формуються на основі принципів перенесення знань і нейронного машинного перекладу, що забезпечує їх узгодженість та масштабованість.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Banarescu, L., Bonial, C., Cai, S., et al. Abstract Meaning Representation for sembanking. *Proceedings of the 7th Linguistic Annotation Workshop and Interoperability with Discourse*. Sofia, 2013. P. 178–186.
2. Damonte, M., Cohen, S. Cross-lingual Abstract Meaning Representation Parsing. *Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the ACL*. Valencia, 2017. P. 878–889.
3. Blloshmi, R., Vanzo, A., Faralli, S., et al. XL-AMR: Enabling Cross-Lingual AMR Parsing with Transfer Learning Techniques. *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 2020. P. 4755–4771.
4. Uhrig, P., Popović, M., Seeker, W., et al. Translate and Parse: Evaluating Cross-Lingual AMR Parsing. *Proceedings of the 61st Annual Meeting of the ACL*. Toronto, 2023. P. 10512–10527.
5. Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., et al. BERTScore: Evaluating Text Generation with BERT. *Proceedings of ICLR*. Addis Ababa, 2020.

УДК 004.8:004.93

Д.Д. Чумичов[1], С.Л. Нікулін[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА КЛАСИФІКАЦІЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕОРНИХ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК

Анотація. Описана розробка та експериментальна перевірка технології нейромережевої класифікації космічних знімків Sentinel-1 і Sentinel-2 для виявлення неорних земельних ділянок. Застосовано архітектуру U-Net з кодувальником EfficientNetV2-L, механізмами уваги та методом головних компонент (PCA) для зниження розмірності спектральних каналів. Навчання проводилось із застосуванням аугментацій, оптимізатора AdamW та косинусного планувальника швидкості навчання, із подальшою перевіркою якості за допомогою Test Time Augmentation. Запропонований підхід забезпечує баланс між високою точністю класифікації та зменшенням обчислювальних витрат, а також демонструє адаптацію конкурсних алгоритмів (BioMassters) для задач, відмінних від лісового моніторингу.

Ключові слова: *багатоканальні космічні зображення, Sentinel, класифікація сільськогосподарських угідь, глибинне навчання, нейронна мережа, механізми уваги, PCA.*

Вступ. Сільськогосподарські угіддя є основою продовольчої безпеки та сталого розвитку. В умовах війни та кліматичних змін в Україні особливо важливим є точний моніторинг стану земель за допомогою супутникових даних. Значні площі покинутих угідь можуть бути ідентифіковані за допомогою гібридних моделей машинного навчання.

Використання нейронних мереж дозволяє враховувати просторово-часові особливості знімків підвищуючи точність і надійність розпізнавання орних і неорних земель порівняно з традиційними методами. У роботі розроблено і протестовано модель, навчену на понад 72000 земельних ділянках, з метою покращення ідентифікації типів землекористування для підвищення ефективності супутникового моніторингу стану земель.

Наукова новизна полягає у застосуванні комбінованого підходу, що об’єднує механізми уваги та PCA для класифікації сільськогосподарських земель з використанням різночасових супутникових знімків. Розроблена технологія забезпечує оптимальне співвідношення між точністю результатів і обчислювальною ефективністю, а також демонструє можливість перенесення алгоритмів, створених у межах змагання BioMassters, на нові типи задач, зокрема пов’язані з агромоніторингом.

Постановка задачі. Мета дослідження полягає у розробці технології класифікації земельних ділянок сільськогосподарського призначення на орні та неорні за допомогою космічних знімків Sentinel і на базі нейромережевої моделі, розробленої для дослідження лісових угідь.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені наступні завдання:

- розробка та експериментальна перевірка технології нейромережевої класифікації для ідентифікації орних і неорних сільськогосподарських ділянок на основі супутникових даних Sentinel-1 та Sentinel-2;
- оцінка ефективності попереднього зниження розмірності спектральних каналів методом PCA.

Основний зміст роботи. Запропонована технологія класифікації сільськогосподарських угідь базується на алгоритмі оброблення космічних знімків – переможці змагання BioMassters [1]. Основу методу становить ітеративне навчання нейронної мережі, де кожен етап уточнює ваги моделі на основі попередніх результатів. Архітектура реалізована у вигляді глибинної мережі U-Net з кодувальником EfficientNetV2-L, попередньо натренованим на вибірці ImageNet-21k. Така структура ефективно виділяє просторово-часові ознаки, необхідні для аналізу мультиспектральних супутникових знімків. Впроваджені механізми уваги (attention) підсилюють найрелевантніші часові характеристики, що підвищує точність класифікації об'єктів за їх динамікою.

Для підвищення швидкодії алгоритму запропоновано зменшувати розмірність вхідних даних із Sentinel-1 і Sentinel-2 за допомогою методу головних компонент (PCA), який, згідно з [2], одночасно скорочує обчислювальні витрати та знижує вплив хмарності. Застосування PCA до знімків Sentinel-2 дозволяє зменшити кількість каналів із 11 до 3 при збереженні більшої частини інформаційної варіації сигналу, що описується рівнянням:

$$X_{PCA} = XW, \tag{1}$$

де W – матриця проекції на перші основні компоненти.

Після застосування PCA три головні компоненти знімків Sentinel-2 об'єднуються з чотирма радіолокаційними каналами Sentinel-1. У результаті формується вхідний тензор $X \in R^{T \times C \times H \times W}$, де T=12 – кількість часових зрізів, C=7 – сукупність каналів (4 Sentinel-1 і 3 PCA-компоненти Sentinel-2), H=W=256 – розмір знімка в пікселях.

Для підвищення здатності моделі до узагальнення використовуються аугментації:

- випадкове горизонтальне віддзеркалення з ймовірністю p=0.5;
- повороти зображень на кути, кратні 90°, для забезпечення інваріантності до орієнтації об'єктів;
- випадкові повороти на кути в діапазоні від −45° до +45°, що імітують природні зміщення та деформації;
- спеціальна аугментація dropout випадково обнуляє близько 30% часових зрізів, моделюючи відсутність супутникових даних, що підвищує стійкість моделі до неповноти часових рядів:

$$m_t = \{0, \text{з імовірністю } p_{drop}\ 1, \text{інакше } \Rightarrow \tilde{X}_t = m_t \cdot X_t, \tag{2}$$

де m_t – маска відсутності даних на часовому індексі t, $\tilde{X}_t$ – отриманий після аугментації тензор.

Для прискорення навчання моделі застосовується автоматичне змішане навчання (Automatic Mixed Precision, AMP). Цей підхід передбачає виконання частини обчислень у форматі float16, тоді як критично важливі операції зберігаються у float32, що запобігає втраті числової точності. Така стратегія суттєво зменшує споживання відеопам'яті та дає змогу використовувати більші розміри пакетів даних (batch size), прискорюючи процес тренування.

Оптимізація параметрів нейронної мережі здійснюється за допомогою алгоритму AdamW, який поєднує адаптивний градієнтний спуск із ваговим розпадом для покращення регуляризації. Це дозволяє уникнути перенавчання та забезпечити стабільну збіжність моделі. Оновлення ваг на і-му кроці можна подати у вигляді рівняння:

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \eta\left(\frac{\hat{m}_i}{\sqrt{\hat{v}_i}+\epsilon} + \lambda\theta_i\right), \quad (3)$$

де η – навчальна швидкість (learning rate), $\hat{m}_i$ та $\hat{v}_i$ – скориговані моменти 1-го та 2-го порядків для градієнтів, λ – коефіцієнт вагового розпаду, що забезпечує регуляризацію.

Для регулювання швидкості використано косинусний планувальник (cosine scheduler), який поступово зменшує розмір кроку навчання відповідно до виразу:

$$\eta_t = \eta_{min} + \frac{1}{2}(\eta_{max} - \eta_{min})\left(1 + cos\left(\frac{t\pi}{T}\right)\right), \quad (4)$$

де t – поточний крок, T – загальна кількість кроків навчання, η_{max} і η_{min} – максимальне й мінімальне значення швидкості навчання відповідно.

Процес навчання моделі організовано у вигляді циклу по епохах, що включає: передавання вхідних даних і масок на GPU, обчислення прогнозів (forward pass), оцінка функції втрат (loss function, наприклад RMSE або MAE) та обчислення градієнтів (backward pass) та оновлення параметрів оптимізатором. Градієнти проходять процедуру масштабування і відсікання аномально високих значень (gradient clipping).

Для контролю якості застосовується валідаційний набір із використанням техніки Test Time Augmentation (TTA). Цей метод передбачає отримання прогнозів не лише для вихідних зображень, а й для їхніх трансформованих версій (горизонтальне, вертикальне та комбіноване віддзеркалення). Остаточне передбачення обчислюється як середнє значення:

$$\hat{y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f\left(\mathrm{T}_i(\mathrm{X})\right), \quad (5)$$

де f – модель, T_i – і-та трансформація, N – кількість трансформацій (у нашому випадку N=4), а X – вхідні дані.

Отримані результати класифікації у вигляді растрових карт класів використовуються для тематичного картографування супутникових знімків.

Запропонований алгоритм поєднує сучасні підходи глибинного навчання, мультиспектральну обробку та високопродуктивні обчислення, забезпечуючи високу точність класифікації, стійкість до пропусків даних і геометричних спотворень і ефективність тренування.

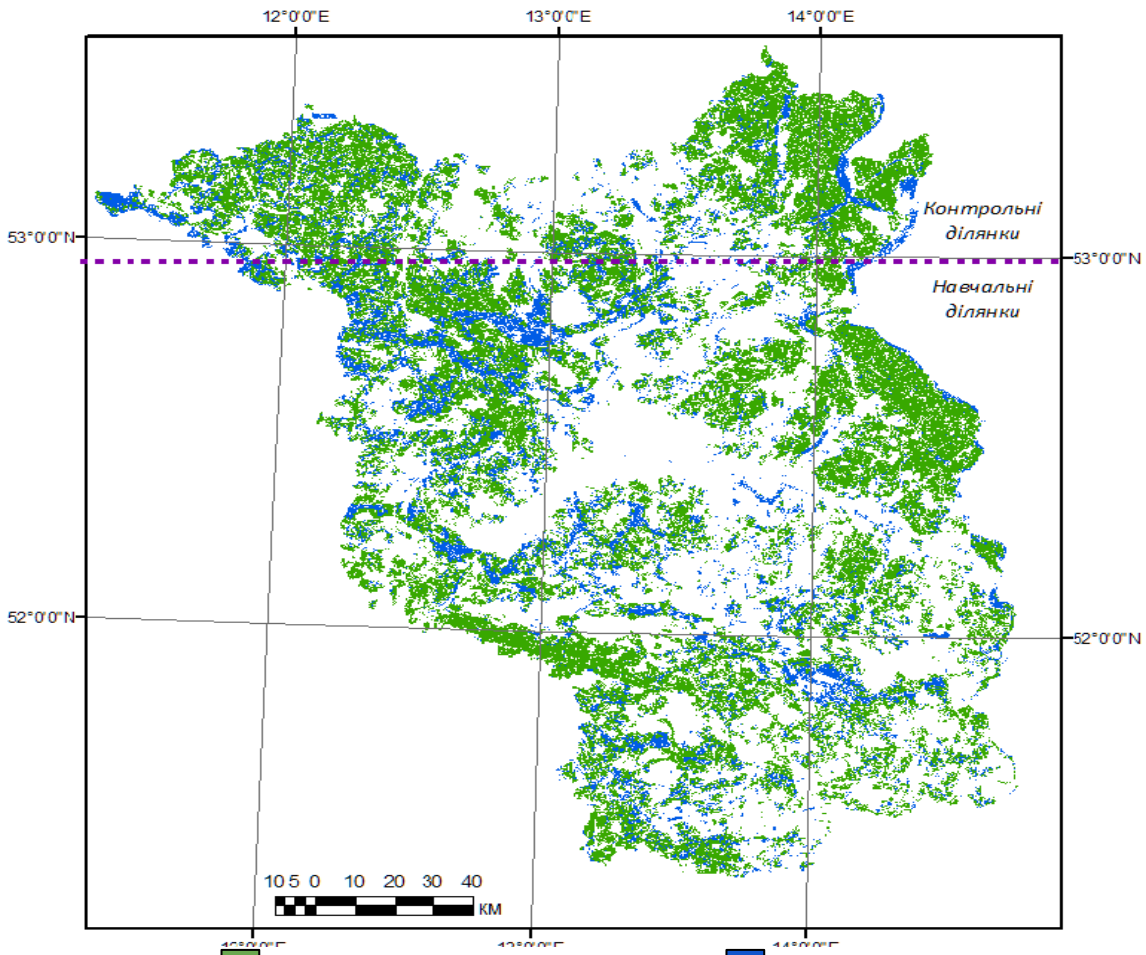
Підготовка знімків. Розроблена технологія враховує особливості використаного набору даних, тому передбачає його попередню підготовку:

- кожна ділянка має містити чотириканальні знімки з супутника Sentinel-1 та одинадцятиканальні знімки з Sentinel-2, отримані протягом року з місячним інтервалом, розміром 256×256 пікселів;
- для кожної ділянки передбачено класифікаційну маску з двома класами;
- усі супутникові знімки супроводжуються метаданими у форматі .csv, де кожен рядок містить атрибутивну інформацію про конкретне зображення.

Формування датасету здійснювалося на основі багатоканальних супутникових знімків, завантажених із платформи Copernicus Browser [3]. Для створення класифікаційних масок було використано ресурс Field Boundaries for Agriculture (fiboa) [4], який надає геопросторові дані у форматі .parquet з описом геометрії полів та їх типів землекористування. Використаний набір даних охоплює близько 90 000 офіційних контурів сільськогосподарських ділянок федеральних земель Берлін і Бранденбург (Німеччина). Дані підготовлені місцевим органом Land Brandenburg у проекції EPSG:25833 (UTM зона 33N) та конвертовані у формат fiboa GeoParquet. Для кожного об’єкта доступні атрибути, такі як тип землекористування, площа, рік збору інформації тощо.

Для задачі класифікації кількість типів землекористування була зведена до двох категорій – орні (рілля) та неорні ділянки, що дозволяє спростити задачу розпізнавання та підвищити точність моделі (рис.2).

Результати практичного застосування. Для навчання нейромережевої моделі було сформовано вибірку, що включала 3690 супутникових знімків Sentinel-1 та Sentinel-2 для тренування і 922 знімки для перевірки якості класифікації. У межах цієї вибірки міститься 90 770 сільськогосподарських ділянок, з яких 43 736 належать до цільового класу – неорні землі. При цьому 20% ділянок, розташованих на північній частині досліджуваної території, використовувалися як контрольна вибірка, тоді як решта застосовувалася для навчання моделі. На рисунку 3 представлено приклади результатів класифікації: еталонні маски тестових даних (а–в) та відповідні результати, отримані моделлю (г–е). Аналіз отриманих результатів показав, що модель коректно відтворює основні просторові особливості полів і достовірно розрізняє орні та неорні ділянки.



Легенда: – Орні угіддя (нецільовий клас); – Не орні угіддя (цільовий клас).

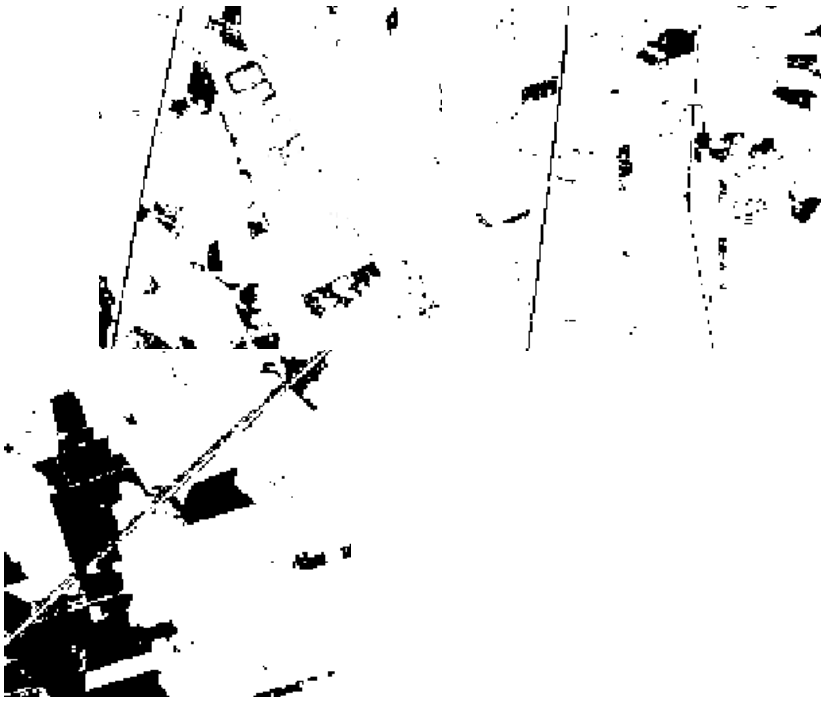
Рис. 2. Досліджувана територія федеральних земель Берлін та Бранденбург (Німеччина) з поділом на орні та неорні ділянки.

У результаті класифікації 18154 тестових земельних ділянок (розташовані вище фіолетової прямої на рис. 2), для яких відомі реальні типи землекористування, були отримані маски, які були порівняні з еталонними значеннями тестової вибірки та визначено правильність класифікації. Отримані значення, наведені у таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

Результати класифікації тестових ділянок

Результат	Кількість ділянок
Правильно класифіковані цільового класу (TP)	7859
Неправильно класифіковані цільового класу (FP)	867
Правильно класифіковані нецільового класу (TN)	8191
Неправильно класифіковані нецільового класу (FN)	1237



а) б) в)

Легенда: □ – неорні ділянки; ■ – інше.

г) д) е)

Рис. 3. Результати роботи моделі: а–в – еталонні маски тестової вибірки; г–е – відповідні маски, отримані моделлю.

Основні метрики точності класифікації, дані у відсотках, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Метрики точності класифікації у відсотках

Точність (Accuracy)	Прецизійність (Precision)	Чутливість (Recall)	F1-score	Специфічність (Specificity)
88.41	90.06	86.4	88.19	90.43

Таким чином, результати експериментів підтверджують ефективність запропонованої технології класифікації. Розроблена модель на основі архітектури U-Net із кодувальником EfficientNetV2-L та механізмом уваги забезпечує високу якість розпізнавання орних та неорних ділянок при прийнятних обчислювальних витратах.

Висновки. Проведене дослідження показало, що модель досягає точності 88,87% без застосування PCA та 87,72% при його використанні, причому впровадження PCA скоротило час тренування приблизно на 20% без помітної втрати якості. Три перші головні компоненти забезпечують накопичену дисперсію 99,05%, що свідчить про збереження основної частки інформації, наявної у 11 каналах Sentinel-2, тоді як сам процес зниження розмірності займає лише 109 секунд. Це дозволило зменшити кількість каналів Sentinel-2 із 11 до 3 без втрати інформативності, оптимізувавши обчислювальні ресурси.

Поєднання даних Sentinel-1 і Sentinel-2 забезпечує комплексний підхід: оптичні канали Sentinel-2 додають спектральну інформацію, а радарні канали Sentinel-1 – структурну та текстурну. Таке комбінування дозволяє покращити класифікацію навіть за наявності хмарності або неоднорідних умов зйомки [5, 6].

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої технології нейромережевої класифікації сільськогосподарських угідь на основі мультиспектральних та радіолокаційних супутникових даних Sentinel. Використання архітектури U-Net з кодувальником EfficientNetV2-L, алгоритмом оптимізації AdamW та планувальником cosine annealing scheduler, доповненої механізмами уваги, забезпечило високу точність класифікації (понад 88%) при прийнятному часі навчання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. DrivenData. The BioMassters Competition: A Benchmark Dataset for Forest Biomass Estimation using Multi-Modal Satellite Time-Series Data, 2023. URL: https://www.drivendata.org/competitions/99/biomass-estimation. 10.57967/hf/1009 (дата звернення: 10.09.2025). https://doi.org/10.57967/hf/1009
2. Kashtan V. Yu., Hnatushenko V., Laktionov I. S., Diachenko H. H. Intelligent Sentinel satellite image processing technology for land cover mapping. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, 5. 143–150 pp. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/143
3. Copernicus Browser. URL: https://browser.dataspace.copernicus.eu. (дата звернення: 15.08.2025).
4. Field Boundaries for Agriculture (fiboa). URL: https://fiboa.org. (дата звернення: 10.08.2025).
5. Pratama Bimo, Danoedoro Projo & Arjasakusuma Sanjiwana. Exploring optimal integration Schemes for Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral data in land cover mapping across

different atmospheric conditions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2015, 34, 101185. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101185
6. De Luca Giandomenico, Silva João, Di Fazio Salvatore & Modica Giuseppe. Integrated use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data and open-source machine learning algorithms for land cover mapping in a Mediterranean region. *European Journal of Remote Sensing*, 2022, 55. 52-70 pp. https://doi.org/10.1080/22797254.2021.2018667

УДК 004.8:004.93

Д.В. Бабець[1], М.О. Гулівець[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ: ІНСТРУМЕНТИ РЕКУРЕНТНОГО ТА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ У ПОЄДНАННІ З МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Проаналізовано та систематизовано сучасні гібридні методи аналізу часових рядів. Виявлено два основні напрямки: (1) методи на основі рекурентного аналізу у поєднанні з машинним навчанням (ML) та (2) методи на основі фрактального аналізу у поєднанні з машинним навчанням (ML). Проведено порівняльний аналіз ефективності та сфер застосування цих підходів у таких галузях, як медицина, промислова інженерія та фінанси. Визначено та порівняно ключові обмеження кожного напрямку, зокрема їх обчислювальну вартість та чутливість до зашумлених даних.

***Ключові слова**: часовий ряд, машинне навчання, гібридний метод, рекурентний аналіз, RQA, RP-CNN, фрактальний аналіз, показник Херста, MFDFA, детекція аномалій.*

Вступ. Часові ряди є фундаментальною формою даних у багатьох прикладних галузях, від медицини (ЕЕГ, ЕКГ) та фінансів до промислового моніторингу (сигнали вібрації, мережевий трафік). Однак ці необроблені дані рідко бувають простими, вони, як правило, є високорозмірними, нелінійними, нестаціонарними та сильно зашумленими.

Ця складність становить суттєву проблему для традиційних методів машинного навчання (ML). Навіть сучасні архітектури, такі як рекурентні (RNN) або згорткові (CNN) нейронні мережі, часто демонструють неефективність при прямій подачі необроблених даних. Їхня здатність до узагальнення знижується, оскільки значущі динамічні патерни приховані шумом та нелінійними взаємодіями.

Особливої актуальності такі підходи набувають при роботі з короткими, зашумленими або нестабільними сигналами, де традиційні статистичні або спектральні методи виявляються малоефективними. Для вирішення цієї проблеми набувають поширення гібридні підходи. Ключова ідея полягає у відмові від прямого аналізу необробленого сигналу на користь потужного етапу підготовки ознак (feature engineering). У ролі таких інструментів підготовки

виступають методи нелінійного аналізу, здатні кількісно описати складну динаміку системи ще до того, як дані потраплять до ML-моделі.

Аналіз сучасної літератури показує, що ці гібридні методи розвиваються у двох потужних, але переважно паралельних напрямках:

1. Рекурентний аналіз (RQA/RP): методи, що аналізують повторюваність станів системи у фазовому просторі.
2. Фрактальний аналіз (FA/DFA): методи, що кількісно оцінюють довготривалу пам'ять та самоподібність сигналу (наприклад, показник Херста).

Хоча обидва підходи успішно застосовуються у поєднанні з ML, бракує систематизації та порівняння саме гібридних моделей, які побудовані на основі підходів рекурентного та фрактального аналізу. Невизначеними залишаються питання їх відносної обчислювальної вартості, стійкості до шуму та ефективності у різних прикладних задачах.

Метою цієї роботи є узагальнення сучасних наукових підходів до використання рекурентного та фрактального аналізу у поєднанні з методами машинного навчання для виявлення структурних змін і переходів між динамічними режимами; побудови ознак та детекції рідкісних або аномальних подій у сигналах різної природи.

Постановка задачі.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі завдання:

1. Проаналізувати гібридні методи на основі рекурентного аналізу, виділивши два ключові підходи:
   - Використання рекурентних діаграм (RP) як 2D-зображень для згорткових нейронних мереж (CNN).
   - Застосування кількісних метрик рекурентного аналізу (DET, LAM тощо) як векторів ознак для класичних моделей ML (SVM, Random Forest).
2. Проаналізувати гібридні методи на основі фрактального аналізу, розділивши їх на два напрямки:
   - Моно-фрактальний аналіз (на базі показника Херста, H), де ML виступає або як класифікатор ознак, або як інструмент оцінки самого H.
   - Мультифрактальний аналіз (MFDFA), де спектр ознак використовується для класифікації.
3. Порівняти сфери застосування проаналізованих методів (напр., біосигнали, фінанси, промислова діагностика) та їх відносну ефективність.
4. Виявити та порівняти ключові обмеження кожного підходу, зокрема їх стійкість до шуму та обчислювальну вартість, для визначення "прогалин" у поточних дослідженнях.

Основний зміст роботи.

Гібридні підходи на основі Рекурентного Аналізу. Методи на основі рекурентного аналізу можна розділити на два основні напрямки: ті, що

використовують рекурентну діаграму (RP) як повноцінне 2D-зображення для згорткових нейронних мереж (CNN), і ті, що використовують кількісні метрики (RQA) як вектор ознак для класичних моделей ML.

Для формалізації поняття рекурентної діаграми скористаємося класичним означенням матриці рекурентності:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \|), \quad (1)$$

де $\mathrm{x}_i = [x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}]$ – вектор вкладення,

ε – поріг близькості,

Θ – функція Хевісайда.

Ця матриця описує моменти, коли система повертається у стан, подібний до попереднього, що дозволяє кількісно аналізувати динаміку навіть для коротких і зашумлених часових рядів.

Перший підхід, який ми умовно назвемо "Зображення", полягає в побудові рекурентної діаграми як входу для CNN (RP+CNN). На рис. 1 наведено приклад рекурентної діаграми для штучно згенерованого часового ряду. Рекурентна діаграма відображає структуру повторюваності станів системи у фазовому просторі. Цей підхід, що став фундаментальним, розглядає 1D-часовий ряд як 2D-зображення «текстури» динаміки системи.

Вперше його ефективність була продемонстрована у [Hatami, 2018]. Автори довели, що подача RP-зображень у відтінках сірого, що дозволяє уникнути втрати інформації від бінаризації, у відносно просту CNN здатна показати конкурентоспроможну точність на широкому наборі еталонних датасетів (UCR-архів). Важливо, що їхній підхід RP+CNN перевершив класичний метод RQA-ознак у поєднанні з SVM.

Рис. 1. Рекурентна діаграма для штучно згенерованого часового ряду

Цей метод швидко знайшов прикладне застосування для детекції аномалій. У [Chen, 2020] гібрид RP+CNN був успішно застосований для контролю якості промислового зварювання, де він також показав значно вищу здатність до виявлення порівняно з RQA+SVM. Аналогічно, [Hsueh, 2019] використав підхід

для діагностики 5 станів індукційного двигуна, досягнувши 99.8% точності. Однак, [Hsueh, 2019] зробив важливе зауваження: необроблені RP-зображення сигналів струму були нерозрізнюваними; висока точність була досягнута лише після специфічної попередньої обробки сигналу ("Max-Min difference") перед генерацією RP.

Незважаючи на успіх, базовий підхід RP+CNN має три фундаментальні проблеми, які були чітко ідентифіковані та вирішені у [Zhang, 2020]:

1. Плутанина тенденцій: звичайний RP, що базується на нормі (відстані), однаково відображає протилежні тренди (наприклад, [1, 2, 3] та [3, 2, 1]).
2. Чутливість до масштабу: ефективність RP залежить від правильного підбору параметрів виміру m та затримки τ, що є нетривіальною задачею.
3. Довгі ряди: ряди довжиною >700 точок створюють обчислювально громіздкі та неінформативні зображення.

Для вирішення цих проблем [Zhang, 2020] запропонував вдосконалений метод MS-RP (Multi-Scale Signed Recurrence Plots). Цей метод вводить "знакову маску" (Signed) для розрізнення тенденцій, варіює m і τ (Multi-Scale) для пошуку найкращого представлення та використовує асиметричні матриці для ефективної обробки довгих рядів. Їхній гібрид MS-RP у поєднанні з FCN (Fully Convolutional Network) показав передові результати, перевершивши всі попередні підходи на 45 датасетах UCR. Проте, цей метод має високу складність налаштування, вимагаючи підбору оптимальних m і τ для кожного датасету, а його ефективність була доведена на "чистих" еталонних даних, а не в умовах сильного шуму.

Другий підхід, що базується на рекурентному аналізі - Підхід "Ознаки" - використовує RQA-метрики як вхід для класичного ML. Цей підхід відмовляється від обчислювально важких CNN і повертається до ідеї класичного машинного навчання. Замість того, щоб інтерпретувати RP як зображення, розраховується набір кількісних показників, відомих як RQA, і використовує їх як компактний вектор ознак. Найбільш поширеними серед них є рівень рекурентності (Recurrence Rate, RR) та детермінізм (Determinism, DET), які обчислюються за формулами:

$$RR = \frac{1}{N^2}\sum_{i,j} R_{i,j}\,,\ DET = \frac{\sum_l lP(l)}{\sum_l P(l)}, \qquad (2)$$

де $P(l)$ – розподіл довжин діагоналей.

Ці метрики кількісно відображають повторюваність і передбачуваність динаміки сигналу та широко застосовуються як ознаки у моделях машинного навчання.

Ідея полягає в тому, щоб звести нелінійний часовий ряд до 6–8 ключових метрик (наприклад, DET, RR, LAM, ENTR, TT), які описують його детермінізм, періодичність та складність, і подати цей вектор у "легкі" та інтерпретовані моделі.

Класичним прикладом є [Thakur, 2024], де вектор RQA-ознак (доповнений метриками мереж повторюваності) був використаний для класифікації динамічних станів (наприклад, хаотичний, періодичний, шум). Дослідження показало, що Random Forest (RF) та SVM, навчені на цих ознаках, досягли високої точності (95% для RF).

Цікавий варіант представлений у [Aceves-Fernandez, 2019], де для класифікації 10 рухів руки за ЕМГ-сигналами використовувалися ознаки Cross-Recurrence (CRQA). Автори продемонстрували, що ці ознаки самі по собі є настільки надійними, що дозволяють досягти високої точності (>90%) навіть без використання ML-класифікатора, підкреслюючи перевагу методу у відсутності потреби в навчанні моделі.

Найбільш просунутий гібрид у цій категорії, що поєднує обидва світи, представлений у [Hertrampf, 2024]. Автори запропонували інноваційний двоступеневий метод для роботи в умовах екстремального шуму:

- розраховано лише одну RQA-ознаку – τ-Recurrence Rate (RRτ) – у ковзному вікні, створивши 2D-спектрограму.
- 2D-зображення, яке по суті є похідною ознакою, а не необроблені RP, було подано в ResNet-50 (CNN).

Результати виявилися надзвичайними: на даних із рівнем шуму, що в 10 разів перевищував сигнал (SNR 0.1), запропанований метод (RRτ + ResNet-50) досяг 75% точності. У тих самих умовах класичний підхід (FFT-спектрограма + CNN) показав лише 17% (рівень випадкового вгадування). Це доводить, що RQA-ознаки здатні фіксувати нелінійну інформацію, яку Фур'є-аналіз повністю втрачає.

Гібриди на основі Фрактального Аналізу.

Другий великий напрямок гібридизації фокусується на фрактальних властивостях сигналу, зокрема на показнику Херста (*H*), для кількісної оцінки довготривалої пам'яті (long-range dependence). Аналіз літератури виявив, що машинне навчання тут відіграє дві принципово різні ролі: (1) H використовується як вхідна ознака для моделі, або (2) ML використовується як інструмент для самої оцінки H.

Моно-фрактальний аналіз (Показник Херста, H). У першій ролі (*H* як ознака), показник Херста розглядається як високоінформативна характеристика, що описує "поведінку" ряду. Показник Херста кількісно описує довготривалу пам’ять сигналу та визначається класичним співвідношенням:

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(n)}, \quad (3)$$

де R/S – відношення розмаху накопиченого відхилення до стандартного відхилення, а n – довжина підвибірки.

Значення $H > 0{,}5$ вказує на наявність позитивної автокореляції (персистентність), $H < 0{,}5$ – на антиперсистентну поведінку, а $H = 0{,}5$ відповідає випадковому шуму.

При використанні показника Херста в якості ознаки для ML моделі, замість подачі необробленого сигналу, модель навчається на його фрактальних властивостях. Яскравим прикладом є [Kirichenko, 2024], де для детекції аномалій, тобто структурних змін у сигналі, автори спочатку розраховують послідовність *H* у вікні ковзання (використовуючи оцінювач Whittle). Цей новий, згладжений часовий ряд оцінок *H(t)* подається в LSTM Autoencoder. Модель, навчена на "нормальному" *H*, успішно ідентифікує аномалії коли фрактальна структура сигналу змінюється, демонструючи високу помилку реконструкції (див. Рис. 6, 10 у [Kirichenko, 2024]).

У другій ролі (ML як інструмент оцінки), ML використовується для заміни класичних, але недосконалих алгоритмів оцінки H (таких як R/S-аналіз або DFA). Головна проблема класичних методів – їхня низька точність та висока дисперсія на коротких або зашумлених часових рядах.

Для вирішення цієї проблеми, низка робіт пропонує навчати ML-регресори безпосередньо на необроблених відрізках часового ряду для прогнозування одного числа – значення H. Переваги є значними:

- Швидкість: У [Mukherjee, 2023] доведено, що їхня проста нейронна мережа (ANN) здатна оцінити показник Херста (H) у 15+ разів швидше за традиційні статистичні методи. При цьому точність оцінки залишається на порівнянному рівні. Такого прискорення досягнуто завдяки тому, що вхідними даними для ANN слугував не "сирий" сигнал, а компактний набір з 10 ознак, підготовлених за допомогою фільтрів експоненційного ковзного середнього (EWMA).
- Точність: [Raubitzek, 2023] продемонстрував, що моделі (зокрема LightGBM та MLP) значно перевершують DFA та R/S за точністю (нижча RMSE), особливо на коротких рядах.

Ключова відмінність у цих підходах полягає в методології навчання. [Raubitzek, 2023] використовував більш об'єктивний підхід, навчаючи моделі на синтетичних даних (fBm та fLm), де H був заздалегідь відомим (еталонним) значенням. Натомість [Di Persio, 2024] навчав свою DNN на реальних фінансових даних, де цільовий H був попередньо розрахований за допомогою того ж R/S-аналізу. Хоча це довело, що DNN може імітувати R/S-аналіз на малих вибірках, по суті, модель навчалася "копіювати" результати (і потенційні помилки) старого методу.

Мультифрактальний аналіз (MFDFA). Якщо моно-фрактальний аналіз описує ряд єдиним показником (H), то мультифрактальний аналіз (MFDFA) пропонує набагато багатший опис, фіксуючи повний спектр сингулярності. Цей набір ознак виявляється надзвичайно потужним для складних класифікаційних завдань.

Метод *MFDFA* базується на оцінюванні масштабної залежності флуктуацій функції:

$$F_q(s) \sim s^{h(q)}, \quad (4)$$

де $F_q(s)$ – усереднена функція флуктуацій для масштабу s, а $h(q)$ – узагальнений показник Херста, який описує локальні властивості самоподібності сигналу.

Ці залежності дають змогу кількісно описати різнорівневу складність сигналів і формують базу для побудови ознак у гібридних ML-моделях.

Дослідження показують, що гібриди на основі MFDFA досягають найвищої точності. У [Medina, 2024] запропоновано інноваційний підхід: 1D-сигнал вібрації перетворюється на 2D-зображення мультифрактального спектру у вигляді поверхні α(q, n). Це зображення потім подається у CNN (для візуального розпізнавання) або, в альтернативному методі, стискається у вектор ознак для Random Forest (RFSD). Обидва підходи показали виняткову точність (97–100%) у класифікації 13-17 типів несправностей насосів та компресорів.

[Anjaiah, 2022] демонструє схожий за точністю, але простіший обчислювально підхід. Замість навчання повноцінної ML-моделі, вони розраховують 3 ключові MFDFA-ознаки (Hq, Eq, Mq) і потім беруть від них Індекс Ексцесу (KI) . Цього виявилося достатньо, щоб статистично розділити 5 класів несправностей з точністю 99.4%.

Ключовий висновок з [Medina, 2024] та [Anjaiah, 2022] полягає в тому, що MFDFA-ознаки настільки інформативні, що дозволяють досягти майже ідеальної точності навіть на необроблених, зашумлених даних, без необхідності у попередній обробці сигналу.

Однак, цей приріст точності має свою ціну. Критичним обмеженням MFDFA-гібридів є їхня екстремальна обчислювальна вартість. [Medina, 2024] прямо вказує, що розрахунок MFDFA-ознак для одного 10-секундного сигналу займав 92 секунди на Matlab. Це робить MFDFA-гібриди непридатними для завдань реального часу, на відміну від миттєвих ANN-оцінювачів H [Mukherjee, 2023].

Обговорення та перспективи.

Створення архітектури гібридних підходів при моделюванні часових рядів передбачає поєднання методів рекурентного або фрактального аналізу з алгоритмами машинного навчання (рис. 2).

На першому етапі з часового ряду формується набір рекурентних або фрактальних дескрипторів, які далі подаються до ML-моделі як вектор ознак.

Такий підхід охоплює різні комбінації, зокрема RP + CNN, RQA + SVM, H + LSTM та MFDFA + RF, що забезпечує гнучкість і стійкість аналізу.

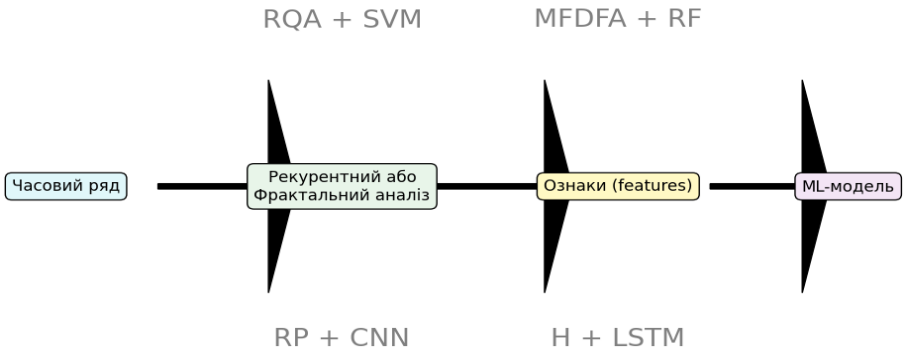


Рис. 2. Архітектура гібридних підходів

Узагальнені порівняльні характеристики сучасних гібридних підходів подано на рис. 3. Як видно з таблиці, методи на основі рекурентного аналізу демонструють вищу стійкість до шуму, тоді як фрактальні підходи забезпечують кращий баланс між точністю та обчислювальною вартістю. Особливо ефективними виявляються комбінації RQA + SVM і MFDFA + RF, які поєднують інтерпретованість дескрипторів із високою продуктивністю алгоритмів машинного навчання.

Таким чином, перспективними напрямками є розробка комбінованих гібридів (RQA + MFDFA). Загалом, ці методи сприяють створенню стійких та інтерпретованих систем для прогнозування, класифікації та виявлення аномалій у реальних задачах.

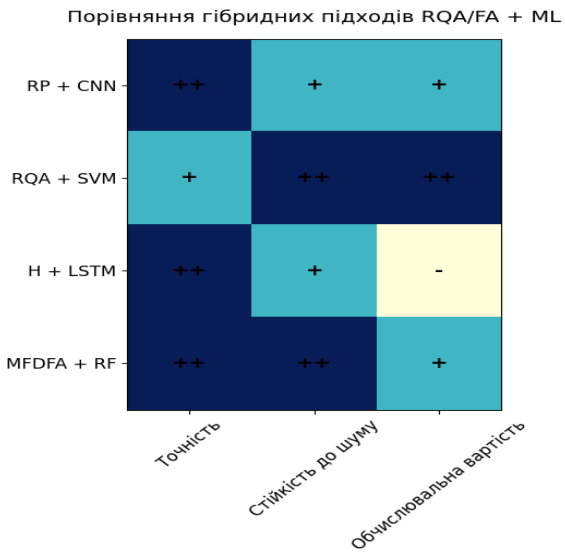


Рис. 3. Порівняння гібридних підходів RQA/FA + ML

Наукова новизна роботи полягає у систематизації та порівняльному аналізі гібридних методів моделювання часових рядів, що поєднують інструменти рекурентного та фрактального аналізу з алгоритмами машинного навчання. Вперше здійснено структурування сучасних підходів у чотири узагальнені категорії: (1) RP + CNN, (2) RQA-дескриптори + класичний ML, (3)

монофрактальні показники (H) + ML, (4) мультифрактальні дескриптори (MFDFA) + ML.

На основі проведеного аналізу виявлено сильні сторони, обмеження та «прогалини» кожного підходу, а також сформульовано критерії вибору оптимальної гібридної архітектури залежно від типу сигналу, рівня шуму та вимог до обчислювальної ефективності.

Отримані результати створюють основу для розроблення адаптивних ML-систем прогнозування та виявлення аномалій, які інтегрують рекурентні й фрактальні дескриптори як високорівневі ознаки.

Висновки. На основі проведеного огляду гібридних методів, які поєднують рекурентний та фрактальний аналіз з машинним навчанням, сформульовано ключові висновки щодо ефективності, обмежень та перспектив розвитку цих підходів.

По-перше, гібридні підходи демонструють значну перевагу над традиційними методами ML. Етап вилучення нелінійних ознак дозволяє їм ефективно обробляти нестаціонарні та зашумлені сигнали. У рекурентному аналізі виділяються два напрямки: використання рекурентних діаграм як 2D-зображень для CNN та застосування RQA-метрик як векторів ознак для класичних моделей.

Прикладом першого є MS-RP [Zhang, 2020], що вирішує проблеми тенденцій і масштабу на UCR-датасетах. Прикладом другого є RRτ-спектрограма [Hertrampf, 2024], яка забезпечила 75% точності при SNR 0.1, значно перевершивши FFT-аналіз.

По-друге, фрактальний аналіз пропонує потужні інструменти для оцінки довготривалої пам'яті. Монофрактальні методи (на базі показника Херста) демонструють підвищення швидкості й точності на коротких рядах, особливо коли ML використовується як інструмент оцінки [Raubitzek, 2023; Mukherjee, 2023]. Водночас мультифрактальні підходи (MFDFA) досягають 99–100% точності в діагностиці дефектів [Medina, 2024; Anjaiah, 2022] без попередньої обробки даних.

Обидва ці методи є особливо ефективними в галузях зі складними сигналами, таких як промисловість та фінанси.

По-третє, порівняльний аналіз виявив фундаментальні компроміси. Рекурентні методи вирізняються вищою стійкістю до шуму та інтерпретованістю, однак вимагають ретельного підбору параметрів. Фрактальні ж підходи демонструють найвищу точність та інформативність ознак, але платою за це є екстремальна обчислювальна вартість. Наприклад, розрахунок MFDFA для одного сигналу може займати понад 90 секунд [Medina, 2024].

Головною "прогалиною" залишається відсутність гібридів, адаптованих для роботи в реальному часі, а також обмежена інтеграція обох представлених напрямків (RQA + FA).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aceves-Fernandez M. A., Ramos-Arreguin J. M., Gorrostieta-Hurtado E., Pedraza-Ortega
2. J. C. Methodology Proposal of EMG Hand Movement Classification Based on Cross Recurrence Plots // Computational and Mathematical Methods in Medicine. – 2019. – Vol. 2019. – Art. ID 6408941.
3. Anjaiah K., Dash P. K., Sahani M. A new protection scheme for PV-wind based DC-ring microgrid by using modified multifractal detrended fluctuation analysis // Protection and Control of Modern Power Systems. – 2022. – Vol. 7. – P. 8.
4. Chen Y., Su S., Yang H. Convolutional Neural Network Analysis of Recurrence Plots for Anomaly Detection // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2020. – Vol. 30, № 1. – P. 2050002.
5. Di Persio L., Dufera T. T. Deep Neural Network Model for Hurst Exponent: Learning from R/S Analysis // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 22. – P. 3483.
6. Hatami N., Gavet Y., Debayle J. Classification of Time-Series Images Using Deep Convolutional Neural Networks // Proc. SPIE 10696, Tenth International Conference on Machine Vision (ICMV 2017). – 2018. – P. 106960Y.
7. Hertrampf T., Oberst S. Recurrence Rate spectrograms for the classification of nonlinear and noisy signals // Physica Scripta. – 2024. – Vol. 99, № 3. – P. 035223.
8. Hsueh Y., Ittangihala V. R., Wu W. B., Chang H. C., Kuo C. C. Condition Monitoring System for Rotation Machine by CNN with Recurrence Plot // Energies. – 2019. – Vol. 12, № 17. – P. 3221.
9. Kirichenko L., Koval Y., Yakovlev S., Chumachenko D. Anomaly Detection in Fractal Time Series with LSTM Autoencoders // Mathematics. – 2024. – Vol. 12, № 19. – P. 3079.
10. Medina R., Sánchez R.-V., Cabrera D., Cerrada M., Estupiñan E., Ao W., Vásquez R. E. Scale-Fractal Detrended Fluctuation Analysis for Fault Diagnosis of a Centrifugal Pump and a Reciprocating Compressor // Sensors. – 2024. – Vol. 24, № 2. – P. 461.
11. Mukherjee S., Sadhukhan B., Das A. K., Chaudhuri A. Hurst exponent estimation using neural network // Int. J. Computational Science and Engineering. – 2023. – Vol. 26, № 2. – P. 157–170.
12. Raubitzek S., Corpaci L., Hofer R., Mallinger K. Scaling Exponents of Time Series Data: A Machine Learning Approach // Entropy. – 2023. – Vol. 25, № 12. – P. 1671.
13. Thakur D., Mohan A., Ambika G., Meena C. Machine learning approach to detect dynamical states from recurrence measures // Chaos. – 2024. – Vol. 34, № 8. – P. 083116.
14. Zhang Y., Hou Y., Zhou S., Ouyang K. Encoding Time Series as Multi-Scale Signed Recurrence Plots for Classification Using Fully Convolutional Networks // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 14. – P. 3818.

УДК 004.9

К.М. Абраменков[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДЕТЕКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА ЗОБРАЖЕННЯХ З ДРОНІВ: МУЛЬТИМОДАЛЬНА ТА ТЕМПОРАЛЬНА ОБРОБКА

Анотація. Мета роботи полягає у дослідженні та розробці комбінованого методу детекції об'єктів на зображеннях, отриманих з безпілотних літальних апаратів, що використовує мультимодальне злиття RGB та термальних даних у поєднанні з темпоральною обробкою послідовних кадрів для підвищення точності та надійності розпізнавання. Методологія базується на аналізі сучасних підходів до обробки мультимодальних зображень, включаючи методи раннього, середнього та пізнього злиття (фузії), темпоральної агрегації з використанням механізмів attention, а також оцінки невизначеності через алеаторну та епістемічну компоненти. Запропонований метод Uncertainty-Guided Spatio-Temporal Multi-Modal Fusion (UG-STMF) інтегрує адаптивне зважування модальностей на основі оцінки якості термального каналу, темпоральну агрегацію з урахуванням зміщення ракурсу камери та ієрархічну оцінку невизначеності з трьох джерел. Наукова новизна полягає у перетворенні зміщення кута огляду між послідовними кадрами з проблеми на інформативну ознаку через введення метрики angular diversity score, розробці модуля Weather-Aware Weighting для динамічного регулювання внеску термального каналу залежно від погодних уфмов, а також у створенні композитного критерію впевненості, що враховує темпоральну консистентність, кутову різноманітність та мультимодальну узгодженість.

Теоретичний аналіз та дані з подібних досліджень вказують на потенціал підвищення повноти виявлення об'єктів на 15-25% та точності на 10-18% порівняно з обробкою окремих RGB-кадрів, а також зниження помилкових спрацювань у 2-3 рази при несприятливих погодних умовах.

***Ключові слова**: детекція об'єктів, безпілотні літальні апарати, мультимодальне злиття, термальні зображення, темпоральна обробка, оцінка невизначеності.*

Вступ. Застосування безпілотних літальних апаратів для моніторингу та пошуку об'єктів набуває дедалі більшого поширення у різних сферах, від рятувальних операцій до наукових досліджень. Сучасні малі дрони, такі як DJI Mavic 3T, оснащені двома типами камер: високої роздільності (до 4K) та термальною (640×512 пікселів), що відкриває додаткові можливості для покращення якості детекції об'єктів за рахунок комплементарності інформації з різних спектральних каналів. Однак обробка зображень з БПЛА має низку специфічних викликів. По-перше, висота зйомки (100-500 м) та змінний кут нахилу камери призводять до того, що об'єкти мають різний ракурс, займають малу частину кадру, що ускладнює їх розпізнавання. По-друге, погодні умови можуть значно погіршувати якість термальних зображень, знижуючи надійність детекції. По-третє, зміщення між послідовними кадрами при перекритті не менше 50% надає додаткову темпоральну інформацію, яку важливо ефективно використовувати. Ключова задача полягає у створенні методу, який дозволить

підвищити вірогідність детекції та точність локалізації об'єктів, зокрема людей, шляхом інтелектуального використання як мультимодальних даних, так і послідовності кадрів зі зміщенням. Це особливо важливо у випадках, коли первинна детекція на окремому кадрі не дає стовідсоткової впевненості в правильності розпізнавання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комбінування інформації з видимого спектру та термальних камер є активним напрямком досліджень у галузі комп'ютерного зору. Дослідження Yang et al. (2022) демонструє ефективність illumination-aware підходу до злиття RGB та інфрачервоних зображень для детекції об'єктів з дронів, де адаптивне злиття результатів базується на оцінці умов освітлення. Автори показали, що при денному світлі більша вага надається RGB-каналу, у сутінках – термальному.

Sun et al. (2024) запропонували гібридну стратегію злиття для відео-детекції об'єктів у RGB-термальних послідовностях, яка поєднує ранню прогресивне злиття та глибоке середнє злиття, досягаючи високого рівня продуктивності при збереженні можливості online детекції зі швидкістю понад 70 кадрів за секунду.

Wang et al. (2023) досліджували об'єкт-центроване темпоральне моделювання для ефективної багатовидової тривимірної детекції об'єктів, використовуючи рекурсивну пам'ять об'єктних запитів, що дозволяє пропагувати інформацію про виявлені об'єкти від кадру до кадру. Метод показує особливо високу ефективність для детекції об'єктів з передбачуваною траєкторією руху.

Chen et al. (2024) представили метод адаптивного вирівнювання ознак для мультимодальної детекції об'єктів на основі БПЛА, який вирішує проблему неточного вирівнювання між модальностями без необхідності складного калібрування. Їхній підхід досягає конкурентної продуктивності на датасеті DroneVehicle.

Song et al. (2025) запропонували метод темпорально узгодженого потоку об'єктів для багатооб'єктного трекінгу, який обробляє множину послідовних кадрів як базову одиницю обробки, досягаючи робастної асоціації у дуже довгих відео через спеціалізовану темпорально-просторову увагу. Yuan et al. (2024) розробили метод попереднього навчання з мультимодальним керуванням ознак для RGB-T сприйняття, який вирішує проблему domain shift при використанні backbone, попередньо навчених на RGB, для екстракції термальних ознак. Незважаючи на значний прогрес у цих напрямках, відсутні комплексні рішення, які б інтегрували мультимодальне злиття з темпоральною обробкою та оцінкою невизначеності з урахуванням специфіки погодних умов та зміщення ракурсу камери дрона.

Метою даної роботи є розробка комбінованого методу детекції об'єктів на зображеннях з дронів, який підвищить точність та надійність розпізнавання порівняно зі стандартними методами обробки окремих кадрів шляхом інтелектуального використання мультимодальних даних RGB та термальних

зображень у поєднанні з темпоральною обробкою послідовних кадрів та ієрархічною оцінкою невизначеності.

Основний зміст роботи.

Мультимодальне злиття RGB та термальних зображень. Базовий принцип мультимодального злиття полягає у використанні комплементарності модальностей: RGB-камери надають детальну просторову інформацію та текстури, тоді як термальні сенсори реагують на температурні контрасти і можуть виявляти об'єкти навіть при поганій видимості. Сучасні підходи до мультимодального злиття можна класифікувати за рівнем інтеграції. Раннє злиття передбачає об'єднання даних на рівні вхідних зображень або ранніх шарів нейромережі. Такий підхід зменшує модальні відмінності на початкових етапах обробки, але може призвести до втрати специфічної інформації кожного каналу. Середнє злиття інтегрує дані на рівні проміжних ознак після незалежної обробки кожної модальності окремими енкодерами. Експериментальні результати показують підвищення точності на 10-25% порівняно з одномодальними методами залежно від умов освітлення (Sun et al., 2024). Пізнє злиття передбачає окреме отримання прогнозів від кожної модальності з наступним об'єднанням результатів на рівні рішень. Спільною проблемою для всіх підходів є чутливість термальних камер до погодних умов. Дослідження показують, що вологість, туман та опади значно знижують контрастність термальних зображень, що призводить до зниження якості злиття. Для БПЛА-моніторингу об’єктів таких як людей це особливо критично, оскільки температурний контраст може бути недостатнім через одяг або несприятливі погодні умови.

Темпоральна обробка послідовних кадрів. Використання послідовності кадрів дозволяє підвищити надійність детекції через накопичення інформації у часі та відстеження траєкторій об'єктів між кадрами. Tracking-by-detection підхід спочатку виконує детекцію об'єктів на кожному кадрі окремо, після чого використовує алгоритми асоціації для встановлення відповідностей між детекціями у послідовних кадрах. Цей метод ефективний, але має обмеження: помилки детекції на окремих кадрах накопичуються, а пропущені об'єкти важко відновити. Спатіо-темпоральні методи розглядають відеопослідовність як тривимірний об'єм даних і застосовують згорткові операції одночасно по просторових та часових вимірах. Підхід з використанням тривимірних фільтрів дозволяє виділяти спатіо-темпоральні ознаки руху, що підвищує точність детекції динамічних об'єктів, однак обчислювальна складність таких методів значно вища. Object-centric temporal modeling фокусується на побудові темпоральних зв'язків між окремими об'єктами, а не між усіма пікселями кадру (Wang et al., 2023). Multi-frame aggregation передбачає накопичення детекцій з кількох послідовних кадрів для підвищення впевненості у наявності об'єкта. Підхід з використанням sliding window обробляє групи по 3-5 кадрів одночасно, що дозволяє усунути випадкові хибні спрацювання та відновити пропущені детекції через часткову оклюзію. Для зображень з дронів зі зміщенням кута огляду особливу цінність має можливість спостерігати один і той самий об'єкт з

різних ракурсів у послідовних кадрах. Це надає додаткову геометричну інформацію та дозволяє підтвердити наявність об'єкта навіть за умови часткової оклюзії на окремих кадрах.

Оцінка невизначеності для адаптивного злиття. Сучасні методи глибинного навчання дозволяють не лише класифікувати об'єкти, але й оцінювати рівень впевненості та невизначеності детекції. Це особливо важливо для інтелектуального об'єднання інформації з різних джерел. Uncertainty-aware fusion використовує оцінки невизначеності для адаптивного зважування внесків різних модальностей або кадрів. Підхід на основі теорії Демпстера-Шафера дозволяє комбінувати докази з різних джерел з урахуванням їх надійності. Density-aware weighting враховує просторову конфіденційність детекцій залежно від відстані до камери. Об'єкти, розташовані ближче до дрону, мають вищу точність локалізації і отримують більшу вагу при злитті. Це особливо актуально для висотної зйомки, де точність детекції різко знижується зі збільшенням відстані. Multi-view consistency перевіряє узгодженість детекцій з різних ракурсів або модальностей. Якщо об'єкт виявлено на RGB-зображенні, але відсутній на термальному, це може сигналізувати про хибне спрацювання.

Запропонований метод UG-STMF. Пропонується комбінований підхід Uncertainty-Guided Spatio-Temporal Multi-Modal Fusion, який інтегрує переваги всіх розглянутих методів. Метод складається з чотирьох основних компонентів. Перший компонент - dual-stream encoder з адаптивне злиття. Для кожної модальності використовуються окремі енкодери на основі архітектури Transformer або CNN-backbone. На проміжних рівнях застосовується механізм cross-modal attention для взаємного збагачення ознак. Ключова новизна полягає у введенні модуля Weather-Aware Weighting, який динамічно регулює внесок термального каналу на основі оцінки якості термального зображення за метриками контрасту та чіткості. Другий компонент - temporal aggregation з multi-view consistency. Послідовність з N кадрів (N=3-5 для перекриття 60%) обробляється через механізм temporal attention. Враховується не тільки часова послідовність, але й зміна ракурсу між кадрами. Вводиться поняття angular diversity score – міра того, наскільки різні ракурси спостереження у послідовності. Чим вища різноманітність, тим більша впевненість у детекції при узгодженості результатів. Третій компонент - hierarchical uncertainty estimation. Система оцінює три типи невизначеності: aleatoric uncertainty (невизначеність даних через шум та погодні умови), epistemic uncertainty (невизначеність моделі через обмеження нейромережі), та multi-view inconsistency (неузгодженість між модальностями та кадрами). Ці оцінки використовуються для адаптивного зважування при фінальному злитті детекцій. Четвертий компонент - confidence-boosted detection fusion. Фінальні детекції об'єднуються через weighted voting mechanism з урахуванням confidence scores від нейромережі, uncertainty estimates, multi-frame consistency, angular diversity та модальної узгодженості.

Наукова новизна методу полягає в практичній реалізації теоретичного підходу та пошуку оптимальньних налаштувань дрона під конкретні погодні

умови. По-перше, на відміну від статичних схем злиття, пропонується динамічне регулювання внеску термального каналу на основі оцінки якості зображення. По-друге, традиційні методи розглядають зміну ракурсу як проблему, тоді як пропонований підхід використовує різноманітність кутів огляду для підвищення геометричної надійності детекції. По-третє, комплексне врахування невизначеності даних, моделі та міжмодальної неузгодженості дозволяє точніше оцінити надійність кожної детекції. По-четверте, замість простого усереднення confidence scores вводиться композитна метрика, що враховує темпоральну консистентність, кутову різноманітність та мультимодальну узгодженість. Теоретичний аналіз та дані з подібних досліджень дозволяють очікувати підвищення recall на 15-25% за рахунок відновлення пропущених детекцій через темпоральну агрегацію, підвищення precision на 10-18% за рахунок фільтрації хибних спрацювань через multi-view consistency, зниження false positive rate у 2-3 рази при несприятливих погодних умовах за рахунок адаптивного зважування, та покращення локалізації об'єктів на 8-12% за рахунок використання кутової різноманітності.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Проведений аналіз сучасних методів обробки мультимодальних послідовних зображень з дронів виявив три основних напрямки: мультимодальне злиття RGB та термальних даних, темпоральна агрегація послідовних кадрів, та використання оцінки невизначеності для адаптивного об'єднання інформації. Кожен з цих підходів має свої переваги та обмеження, але їх комбінування створює синергетичний ефект.

Адаптація методу Uncertainty-Guided Spatio-Temporal Multi-Modal Fusion дозволить інтегрувати адаптивне мультимодальне злиття з урахуванням погодних умов, темпоральну агрегацію з використанням зміщення ракурсу, та ієрархічну оцінку невизначеності. Основним напрямком адаптації є перетворення зміщення кута огляду між послідовними кадрами з проблеми на інформативну ознаку, що підвищує геометричну надійність детекції.

Перспективи подальших досліджень включають експериментальну валідацію методу на реальних даних з DJI Mavic 3T, оптимізацію архітектури для зменшення обчислювальної складності, та розробку online версії алгоритму для роботи в режимі реального часу. Також перспективним є дослідження застосування методу до інших типів об'єктів (транспортні засоби, тварини) та умов зйомки (різна висота, швидкість руху дрона).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Chen C., Zheng Z., Huang Y., Ding X., Yu Y. Weakly Misalignment-free Adaptive Feature Alignment for UAVs-based Multimodal Object Detection. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 1234-1243. DOI: 10.1109/CVPR.2024.00123
2. Lee C., Zhang W., Lou X., Li M. Caltech Aerial RGB-Thermal Dataset in the Wild. European Conference on Computer Vision (ECCV). 2024. P. 567-582. DOI: 10.1007/978-3-031-73220-1_27

3. Liu H., Fan K., Ouyang Q., Li N. Real-time small drones detection based on pruned YOLOv4. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 10. P. 3374. DOI: 10.3390/s21103374
4. Pang B., Li Y., Zhang Y., Li M., Lu C. TubeDETR: Spatio-Temporal Video Grounding with Transformers. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2022. P. 16442-16453. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01596
5. Song Z., Luo R., Ma L., Tang Y., Chen Y., Yu J., Yang W. Temporal Coherent Object Flow for Multi-Object Tracking. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2025. Vol. 39, No. 7. P. 6978-6986. DOI: 10.1609/aaai.v39i7.32749
6. Sun Y., Cao B., Zhu P., Hu Q. High performance RGB-Thermal Video Object Detection via hybrid fusion with progressive interaction and temporal-modal difference. Information Fusion. 2024. Vol. 109. P. 102434. DOI: 10.1016/j.inffus.2024.102434
7. Wang Q., Chen Y., Pang J., Li N., Zhang Y. Exploring Object-Centric Temporal Modeling for Efficient Multi-View 3D Object Detection. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023. P. 8342-8351. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00765
8. Yang L., Ma R., Zakhor A. Drone Object Detection Using RGB/IR Fusion. arXiv preprint arXiv:2201.03786. 2022. 8 p. DOI: 10.48550/arXiv.2201.03786
9. Yuan, M., Wang, Y., Ouyang, J., Zhang, T., & Li, H. (2024). C2Former: Calibrated and Complementary Transformer for RGB-Infrared Object Detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-15. https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3371396, https://arxiv.org/html/2306.16175v3
10. Yuan, M., Ouyang, J., Zhang, T., Wang, Y., & Li, H. (2024). Multimodal Feature-Guided Pretraining for RGB-T Perception. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17, 8542-8556. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3384520, https://ieeexplore.ieee.org/document/10663834

РОЗДІЛ 4

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056:004.94

В.І. Корнієнко[1], О.А. Довбиш[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ ШАХРАЙСТВУ В ОНЛАЙН-ІГРАХ

Анотація. Розглянуто багатокористувацькі онлайн-ігри та методи забезпечення безпеки даних при їх розробці та використанні. Проаналізовані методи розробки онлайн-ігр, інструменти розробки (Unity Engine, Photon Fusion) та засоби захисту даних (Firebase). Проведено огляд основних методів забезпечення кібербезпеки та особливості їх застосування у сучасних онлайн-іграх. На прикладі розробки багатокористувацької гри показано інтеграцію інструменту SDK Photon Fusion для забезпечення мережевої синхронізації у режимі Shared Mode. Реалізовано функціонал аутентифікації та зберігання даних на платформі Firebase із впровадженням сучасних методів захисту персональних даних. Тестування підтвердило стабільну роботу гри та ефективність використаних інструментів.

***Ключові слова**: онлайн-ігри, безпека даних, захист інформації, методи аналізу, інструмент розробки, тестуванняі*

Вступ. Розвиток інформаційних технологій та мережевих інфраструктур сприяє стрімкому зростанню популярност багатокористувацьких онлайн-ігор. Такі ігри не лише забезпечують гравцям захоплюючий ігровий досвід, але й формують цілі спільноти, об'єднуючи мільйони користувачів у всьому світі. Водночас зростає і складність вимог до технологій, які забезпечують функціонування цих ігор, зокрема, - до їхньої продуктивності, інтерактивності та рівня безпеки даних.

Актуальність теми визначається стрімким розвитком ринку онлайн-ігор, постійним зростанням загроз кібербезпеці у цій сфері та необхідністю створення якісного ігрового продукту, що відповідає сучасним вимогам.

Мета роботи: підвищення рівня кібербезпеки в онлайн-іграх шляхом обґрунтування, розробки та використання ефективних методів і засобів кіберзахисту для запобігання чітерству, які знижують ризик несанкціонованих дій користувачів і забезпечують чесну ігрову взаємодію.

Постановка задачі. Кібербезпека в онлайн-іграх є одним із найважливіших аспектів, адже втручання зловмисників може призводити до витоку персональних даних, порушенню цілісності ігрових процесів та значних фінансових втрат, як для користувачів, так і для компаній-розробників. Інтеграція сучасних засобів захисту даних із системами багатокористувацьких ігор є невід’ємною складовою їхньої стабільної роботи.

Для обґрунтування методів та засобів забезпечення кібербезпеки при розробці та використанні багатокористувацьких онлайн-ігор необхідно виконати:

– аналіз предметної області, зокрема, провести аналіз вразливостей, аналіз рівня сучасних технологій розробки онлайн-ігор та методів захисту даних;

– розглянути практичну реалізацію багатокористувацької гри та використання методів забезпечення безпеки даних користувачів;

– провести тестування обраних рішень, зокрема оцінити процеси збереження і отримання даних користувачів, мережеву взаємодію між гравцями та коректність авторизації гравців.

Основний зміст роботи. Розглянемо сучасні інструменти, такі як Unity Engine [1] для створення ігрового середовища, Photon Fusion [2] для реалізації багатокористувацького режиму та Firebase [3] для зберігання даних користувача та його аутентифікації.

Функціонал Unity, зокрема, його компонентна архітектура, підтримка численних платформ і потужний інструментарій, роблять цей сервіс ідеальним вибором для створення сучасних ігор. Попри певні обмеження, такі як вимогливість до ресурсів і складності оптимізації високоякісної графіки, Unity залишається популярним інструментом як для інді-розробників, так і для великих студій. Його активна спільнота, великий вибір готових активів і регулярні оновлення роблять його надійною основою для реалізації складних проектів. Отже, Unity Engine є оптимальним вибором для створення багатокористувацьких онлайн-ігор завдяки його гнучкості, простоті використання та широким можливостям інтеграції [1].

Photon Fusion, у свою чергу, надає можливості для реалізації мережевої взаємодії із низькою затримкою та високою продуктивністю [4].

Серед доступних мережевих моделей було обрано Shared Mode, оскільки він дозволяє клієнтам мати повний стан гри з одночасною синхронізацією через сервер. Цей підхід забезпечує прозорість даних між гравцями, підвищуючий Сервер виступає авторитетом, що дозволяє запобігти шахрайству та перевіряти всі зміни стану гри, інтерактивність і точність відображення подій у реальному часі.

Попри недоліки, такі як підвищене навантаження на мережу та складність управління конфліктами змін, Shared Mode надає раціональний баланс між продуктивністю та функціональністю для ігор із багатьма активними користувачами. Додатково, інтеграція з Firebase надає широкі можливості для управління автентифікацією та зберіганням даних, що підвищує загальну надійність системи.

Firebase забезпечує надійність і безпеку при зберіганні даних користувачів та автентифікації. Сервіси Firebase пройшли сертифікацію за міжнародними стандартами (ISO, SOC), що гарантує безпеку даних [5]. Також Firebase використовує шифрування даних під час передачі за допомогою HTTPS. Гнучкі правила доступу до баз даних дозволяють уникнути несанкціонованого доступу.

Використання Firebase дозволяє легко інтегрувати системи автентифікації, що критично для безпеки кіберпростору. Попри можливу залежність від хмарної інфраструктури Google, платформа надає зручні інструменти для роботи з масштабованими проєктами.

Отже, рішення використовувати Unity Engine у поєднанні з Photon Fusion у режимі Shared Mode та Firebase є виправданим для розробки сучасної багатокористувацької гри. Це дозволяє забезпечити плавний ігровий процес завдяки швидкій синхронізації даних та підвищити безпеку даних користувачів, використовуючи механізми Firebase.

Застосування цих інструментів сприяє створенню надійного та захищеного ігрового середовища, що відповідає сучасним стандартам кібербезпеки.

При розробці сучасної багатокористувацької гри реалізується інтеграція мережевої взаємодії, механізмів синхронізації, системи управління гравцем, генерації рівнів гри із забезпеченням безпеки даних користувачів.

Розробка гри починається з вибору відповідних інструментів. Unity обрано за його гнучкість, компонентний підхід і підтримку кросплатформенності, що дозволяє ефективно створити тривимірний ігровий світ із динамічними елементами. Photon Fusion забезпечує надійну мережеву синхронізацію у режимі Shared Mode, що дозволяє підтримувати спільний ігровий процес із мінімальними затримками. Інтеграція Firebase дозволяє створити безпечну систему автентифікації користувачів, зберігання їхніх даних і організації лідерборду.

Використання Firebase Authentication забезпечує безпеку облікових записів через шифрування і дотримання міжнародних стандартів безпеки (ISO, SOC) [5]. Впроваджено валідацію введених даних для уникнення некоректної реєстрації чи входу. Дані користувачів зберігаються у Firebase Realtime Database, яка забезпечує їхню ізоляцію та доступ лише через унікальний User ID. Також було реалізовано механізм генерації рівнів на основі сіду, що гарантує однакові умови гри для всіх учасників. Система управління гравцем дозволяє інтуїтивно керувати його переміщенням, уникаючи перешкод і збираючи бонуси. Нарахування очок залежить від швидкості пересування, що додає ігровій механіці стратегічної складової.

На завершальному етапі було розроблено лідерборд, який надає гравцям доступ до оновлюваних рейтингів, стимулюючи конкурентний дух. Після завершення гри результати кожного гравця автоматично передаються до бази даних, забезпечуючи прозорість ігрового процесу.

Проведене тестування підтвердило стабільність роботи гри в багатокористувацькому середовищі. Реалізовані рішення щодо кібербезпеки продемонстрували свою ефективність. Створена гра відповідає сучасним вимогам до безпеки, продуктивності та інтерактивності, що робить її перспективною для подальшого вдосконалення.

Наукова новизна розробки полягає у підвищенні рівня кібербезпеки в онлайн-іграх шляхом обґрунтування, розробки та використання ефективних

методів і засобів для запобігання чітерству, що понижує ризики несанкціонованих дій користувачів і забезпечують чесну ігрову взаємодію.

Висновки. На основі проведеного аналізу обрано технології Unity Engine, Photon Fusion та Firebase. Визначено, що поєднання сучасних технологій та підходів для створення багатокористувацької онлайн-гри, відповідає високим вимогам до продуктивності, інтерактивності та безпеки. Реалізовані рішення забезпечують стабільність ігрового процесу, зручність користування та захист даних користувачів, що є критично важливими аспектами для сучасних ігрових проектів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Unity Documentation [Електронний ресурс] - https://docs.unity.com/
2. Photon Fusion Documentation [Електронний ресурс]-https://doc.photonengine.com/fusion/.
3. Firebase Documentation [Електронний ресурс] - https://firebase.google.com/docs?hl=ru.
4. Building Multi-User ML2 applications with Photon Fusion [Електронний ресурс] - https://developer-docs.magicleap.cloud/docs/guides/third-party/networking/photon-fusion/.
5. Understand Firebase Realtime Data base Security Rules [Електронний ресурс] - https://firebase.google.com/docs/database/security.

УДК 004.415.3:681.6

Д.Д. Самойленко[1], Д.С. Тимофєєв[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕСТУВАННЯ НА ПРОНИКНЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Досліджено можливості генеративного штучного інтелекту для автоматизації тестування на проникнення. Запропоновано архітектуру системи на базі GPT-4, реалізовано експериментальний прототип і продемонстровано його ефективність на віртуальній машині з вразливостями REDEEMER.

***Ключові слова**: тестування на проникнення, штучний інтелект, автоматизація тестування, кібербезпека,, GPT-4, prompt-engineering, Python, Hack The Box.*

Вступ. Значне зростання кількості кіберзагроз і складності атак зумовлює потребу у проведенні ефективних і регулярних перевірок стану безпеки інформаційно-комунікаційних систем. Тестування на проникнення (пентест) стало невід'ємною складовою сучасних стратегій кіберзахисту, проте традиційні методи залишаються трудомісткими, дорогими та суттєво залежать від людського фактора. Розвиток генеративного штучного інтелекту, зокрема великих мовних моделей, відкрила нові можливості щодо створення автономних інтелектуальних систем, здатних виконувати аналітичні та процедурні завдання з пентесту. Інтеграція таких моделей у процес тестування дозволяє підвищити

швидкість, масштабованість і відтворюваність результатів, що робить цей напрям досліджень надзвичайно актуальним для сучасної кібербезпеки.

Постановка задачі. Мета роботи полягає у створенні автоматизованої системи тестування на проникнення на основі мультимодальної великої мовної моделі GPT-4, здатної виконувати ітеративні дії з мінімальним втручанням людини. Для досягнення мети визначено такі завдання:

– проаналізувати сучасні методики проведення тестування на проникнення;
– дослідити підходи до автоматизації процесу тестування;
– спроєктувати архітектуру автоматизованого конвеєра з інтеграцією GPT-4 через OpenAI API;
– реалізувати прототип системи на мові програмування Python;
– провести експериментальні дослідження в середовищі Hack The Box та оцінити ефективність розробленого рішення.

Основний зміст роботи. З огляду на зростання кількості кібератак та прогнозовані економічні збитки світової економіки у 10,5 трлн. дол. США до 2025 року [1], підвищення ефективності тестування на проникнення набуває стратегічного значення. Динаміка появи нових вразливостей потребує безперервного проведення перевірок, однак ручний підхід залишається ресурсоємним і залежним від дефіциту кадрів, який у світі перевищує 4 млн. фахівців [2]. Це зумовлює високу вартість послуг, затримки та зниження частоти аудиту, що підвищує ризики безпеки. У цьому контексті автоматизація процесів із застосуванням ШІ постає як ефективний засіб забезпечення регулярності, масштабованості та економічної доцільності тестування. За прогнозами Gartner, до 2026 року понад 60% організацій інтегрують технології штучного інтелекту у свої стратегії кіберзахисту [3].

Згідно зі стандартом ISO/IEC TS 27008:2019, методи тестування поділяються за ступенем поінформованості аудитора та об’єкта перевірки[4] на:

- Blind testing – удитор не має попередньої інформації, а об’єкт знає про перевірку. Метод оцінює компетентність аудитора, але має обмежене практичне застосування;
- Double blind testing – жодна зі сторін не має інформації про процес. Це імітує реальні атаки й перевіряє здатність організації реагувати на несподівані інциденти;
- Grey box testing – аудитор має часткові знання про систему, що дозволяє сфокусуватись на вразливих ділянках і зберегти баланс між реалістичністю та контрольованістю;
- Double grey box testing – обидві сторони мають обмежені знання. Використовується для внутрішніх аудитів;
- Tandem testing – усі учасники знають деталі процесу. Застосовується для оцінки ефективності внутрішнього контролю;
- Reversal testing – аудитор має повне уявлення про систему, тоді як об’єкт не знає про час і спосіб перевірки. Це найреалістичніший варіант, що відображає поведінку реального зловмисника.

У дослідженні використано підхід Reversal testing, що дозволяє оцінити рівень автономності GPT-4 у процесі виконання команд і прийняття рішень.

Порівняння ручного та автоматизованого підходів демонструє суттєву різницю у швидкості, вартості та масштабованості. Ручне тестування дозволяє глибоко дослідити логіку бізнес-процесів, але потребує експертних знань і великих ресурсів. Автоматизований підхід, навпаки, забезпечує повторюваність, швидкість і можливість одночасного сканування багатьох систем, хоча не завжди розпізнає складні логічні вразливості. Оптимальним рішенням є гібридна модель, де ШІ бере на себе рутинні аналітичні завдання (сканування, розвідку, підбір команд), а спеціаліст здійснює стратегічний контроль і верифікацію результатів. Такий баланс дозволяє підвищити якість тестів, зменшити навантаження на фахівців і скоротити час перевірок.

Використання ШІ в пентестах супроводжується низкою обмежень і ризиків. Насамперед – це можливість хибно-позитивних або негативних результатів, коли модель помилково оцінює уразливість. Крім того, мовні моделі вразливі до prompt-ін'єкцій та отруєння даних [5], що може призвести до неконтрольованої поведінки. Іншим ризиком є витік інформації при використанні хмарних API [6]. Також актуальним залишається етичний аспект: автономні агенти не повинні здійснювати дії, що можуть завдати шкоди, або виходити за межі тестового середовища. Тому розроблена система працювала виключно у навчальній інфраструктурі HTB, із суворими обмеженнями на небезпечні команди та передачу даних.

Для реалізації експериментальної частини було обрано платформу Hack The Box (HTB), яка надає безпечне ізольоване середовище з вразливими віртуальними машинами. Підключення здійснювалося через OpenVPN 2.6.3, що створює зашифрований тунель між атакуючою системою Kali Linux і мережею HTB. Конфігураційний файл .ovpn забезпечує автентифікацію користувача, автоматичне підключення до IP-адреси сервера HTB, а інтерфейс tun0 формує віртуальний мережевий канал для передачі даних. Такий підхід гарантує повну ізоляцію трафіку та безпечну взаємодію під час пентесту.

Розробка реалізована мовою Python 3.11.4, із застосуванням бібліотек openai, subprocess, requests, pathlib. Система побудована з двох незалежних модулів - контролера діалогу (main.py) та локального виконавця команд (executor.py). Контролер відповідає за взаємодію з GPT-4: він формує системний prompt, надсилає запит до OpenAI API та записує отримані інструкції у файл next_command.txt. Його завдання – забезпечити безперервний цикл комунікації між моделлю та середовищем. Виконавець, у свою чергу, зчитує цей файл, виконує команду у середовищі Kali Linux, а результат записує до output.txt. Потім дані повертаються в контролер для повторної інтерпретації. Обидва модулі працюють асинхронно, створюючи цикл «модель → команда → виконання → результат → модель». Така архітектура проста, але забезпечує повну відтворюваність дій, що є ключовою вимогою у пентестах (Рисунок 1).

Системний prompt (pretext) побудований відповідно до принципів prompt engineering і включає:

1) Роль. Модель виступає автономним помічником із пентесту:

«You are an autonomous penetration testing assistant… Your ultimate goal is to capture the flag…»

2) Контекст. Підказка описує середовище Kali Linux, адреси LHOST та RHOST, типові формати прапорів HTB та послідовність дій:

«…testing from a Kali Linux system at {LHOST}… The flag looks like HTB{…} or flag{…}… Start with port scanning only if it hasn't been done already…»

3) Обмеження. Встановлено заборони: не використовувати інтерактивні інструменти, не повторювати сканування, віддавати пріоритет прямим експлойтам:

«Avoid interactive tools (msfconsole, telnet, nc -lvnp…), avoid repeating scans, move directly to exploitation…»

4) Формат виводу. Відповідь містить чотири чіткі блоки:

Next Command – конкретна команда, яку потрібно виконати далі;

Justification – стисле обґрунтування вибору цієї команди на основі попереднього контексту;

Lessons Learned – короткий аналітичний підсумок попереднього кроку, що дозволяє моделі зберегти інформацію та уникнути зайвих дій.

Response – повний текстовий вивід останньої виконаної команди. Така конфігурація дозволяє безпосередньо порівнювати обґрунтування моделі та фактичні результати виконання в одному вікні, що спрощує ретроспективний аналіз.

Ця структура забезпечує контрольований перебіг тесту та спрощує аналіз дій моделі.

Алгоритм, зображений на Рисунку 1, реалізує поетапну взаємодію GPT-4 із середовищем:

Крок 0 – Ініціалізація. Система починає роботу із запису стартової команди у next_command.txt. Паралельно створюється історія діалогу з системним префіксом і початковими параметрами. Виконавець починає моніторинг файлу команд.

Крок 1 – Зчитування результату. Після виконання попередньої команди модулем executor.py у каталозі з'являється або оновлюється файл output.txt з результатом. Контролер (main.py) фіксує його появу, зчитує зміст і додає його до історії діалогу як нове повідомлення ролі user.

Крок 2 – Формування запиту до моделі. Контролер відправляє отриманий вивід до GPT-4 через OpenAI API, передаючи системний prompt (pretext), історію сеансу та найновіший результат. Це надає моделі повний контекст – які команди були виконані, які порти або служби були виявлені та які результати отримано.

Крок 3 – Генерація наступної команди. GPT-4 обробляє наданий контекст і створює наступну інструкцію. У відповіді модель суворо дотримується

заданого формату. Контролер приймає цей вихідний результат і записує його в next_command.txt, тим самим створюючи наступне завдання для виконавця.

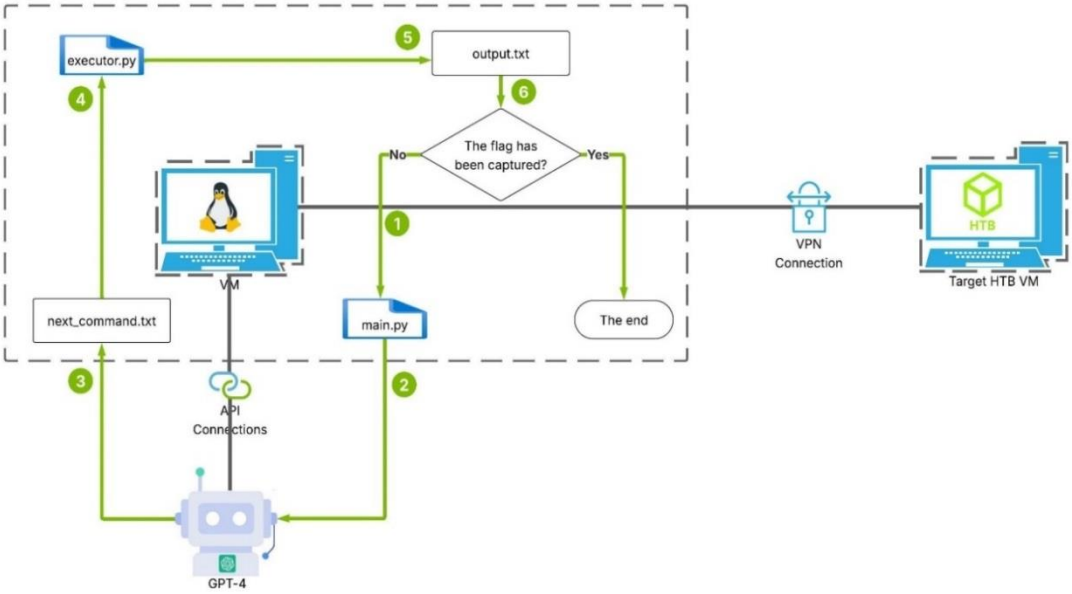


Рис. 1. Архітектура та алгоритм взаємодії компонентів системи

Крок 4 – Виконання команди. Модуль executor.py постійно відстежує зміни у файлі next_command.txt. Після виявлення нового вмісту він парсить текст команди, виконує її у локальному shell-середовищі та збирає результат виконання.

Крок 5 – Запис результату. Виконавець форматує зібраний вихід (stdout і stderr) у стандартизований шаблон відповіді і записує його в файл output.txt, надаючи зворотний зв'язок для моделі.

Крок 6 – Перевірка умови зупинки. Контролер перевіряє новий вивід: якщо знайдено рядок, що відповідає патернам прапорів, процес завершується. Якщо ні – цикл повертається до кроку 1.

Запропонована архітектура поєднує інтелектуальну потужність GPT-4 з простотою локального виконання команд, утворюючи замкнутий цикл автоматизації пентесту. Чітке розділення обов'язків між контролером діалогу та виконавцем забезпечує прозорість взаємодії, а файловий інтерфейс робить систему стійкою до збоїв і легкою у відтворенні. Використання ретельно структурованого prompt-у гарантує стабільний формат відповідей і точне виконання логіки.

Для оцінки продуктивності розробленої автоматизованої системи тестування на проникнення було проведено експериментальну сесію з використанням вразливої віртуальної машини REDEEMER на платформі HTB. Метою цієї демонстрації було не лише підтвердити можливість успішного захоплення прапору, але й наочно продемонструвати поведінку моделі GPT-4, логіку її рішень та механізм взаємодії між усіма компонентами системи –

контролером, виконавцем і самою моделлю. Процес експерименту відображався у форматі подвійної панелі, де кожен етап тестування представлено у вигляді синхронного відображення дій у Linux-середовищі та аналітичної відповіді мовної моделі, що дозволило детально відстежувати взаємозв'язок між реальними діями та рішеннями GPT-4.

Під час дослідження використовувалося подвійне відображення процесу через tmux: ліва частина термінала демонструвала виконання команд у Kali Linux – сканування, підключення до цільового сервісу, виконання інструкцій, тоді як права відображала структуровані відповіді GPT-4 з поясненнями, аналізом і наступними кроками. Такий підхід забезпечив повну прозорість взаємодії системи, дозволив простежити причинно-наслідкові зв'язки між кожною командою та згенерованою реакцією моделі, а також наочно підтвердив коректність і стабільність роботи всієї архітектури.

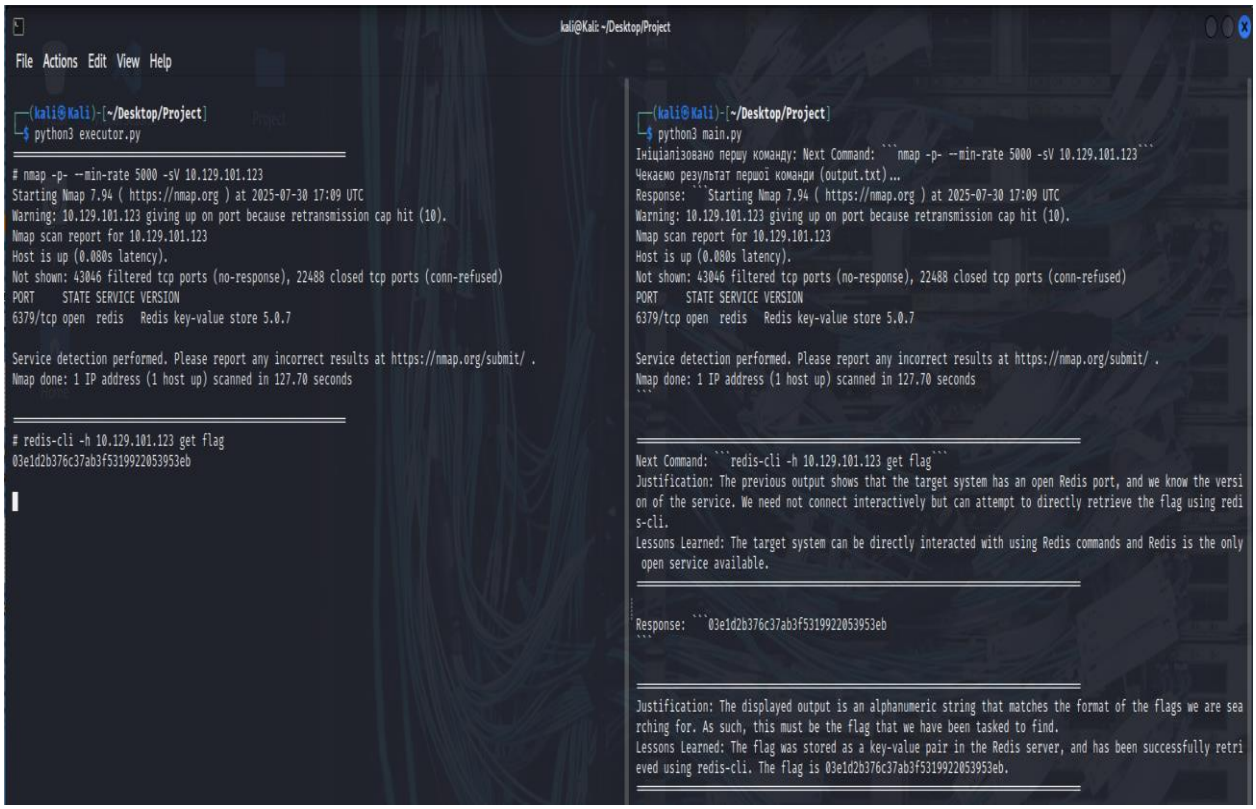


Рис. 2 Демонстрація автоматизованого захоплення прапору на машині REDEEMER

Сесія REDEEMER розпочалася зі стандартного етапу розвідки. Модель ініціювала команду nmap -p- --min-rate 5000 -sV 10.129.101.123, що дозволило швидко виявити відкриті порти та сервіси. Сканування зафіксувало один відкритий порт 6379/tcp, ідентифікований як Redis v5.0.7. У полі «Justification» GPT-4 зазначив, що неавтентифікований екземпляр Redis часто є критичною слабкістю, оскільки може дозволити прямий доступ до даних сервера. Після розвідки модель згенерувала наступну команду redis-cli -h 10.129.101.123 get flag, аргументуючи це тим, що Redis зазвичай зберігає дані у форматі ключ-значення,

а в навчальних або демонстраційних сценаріях прапор часто зберігається під ключем flag. У полі «Lessons Learned» зазначалося, що Redis не потребує автентифікації за замовчуванням, що дозволяє отримати прямий доступ до його бази даних. На лівій панелі терміналу відображено виконання команди, результат якої підтверджує успішне отримання прапору: 03e1d2b376c37ab3f5319922053953eb. GPT-4 у розділі «Justification» пояснила, що цей результат є дійсним прапором, а в «Lessons Learned» підсумувала, що ціль була досягнута шляхом прямого запиту до Redis, без необхідності експлуатувати інші сервіси чи підбирати паролі.

Наукова новизна. Розроблена система поєднує генеративну модель типу GPT-4 із файловим механізмом взаємодії, що забезпечує повний цикл автоматизованого пентесту. Використання структурованого prompt-engineering дозволило формалізувати логіку прийняття рішень і створити передбачувану модель поведінки. Система демонструє здатність автономно аналізувати результати, приймати рішення та завершувати перевірку, що підтверджує її ефективність в процесі підтримки прийняття рішень в кібербезпеці.

Висновки. Проведене дослідження довело, що використання генеративного штучного інтелекту в автоматизації тестування на проникнення є ефективним і перспективним напрямом розвитку кібербезпеки. Запропонована система, реалізована на основі GPT-4, успішно продемонструвала автономне виконання пентесту на вразливій машині REDEEMER, від етапу розвідки до захоплення прапору. Розроблене рішення поєднує простоту реалізації з високою надійністю. Архітектура, побудована на двох модулях і файловому інтерфейсі, забезпечує стабільність, прозорість і можливість масштабування. Використання структурованого prompt-engineering дало змогу контролювати логіку дій моделі та уникнути небезпечних або повторних команд. Практична цінність роботи полягає в тому, що створений прототип може бути застосований у навчальних і дослідницьких цілях, а також слугувати основою для побудови корпоративних ШІ-асистованих систем безпеки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cybersecurity Ventures Report on Cybercrime. eSentire. URL: https://www.esentire.com/cybersecurity-fundamentals-defined/glossary/cybersecurity-ventures-report-on-cybercrime.
2. The Cybersecurity Workforce Gap. Center for Strategic and International Studies (CSIS) Analysis. URL: https://www.csis.org/analysis/cybersecurity-workforce-gap.
3. Gartner identifies the top cybersecurity trends for 2023. Gartner newsroom press release. URL: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/04-12-2023-gartner-identifies-the-top-cybersecurity-trends-for-2023
4. ISO/IEC TS 27008:2019. Information technology — Security techniques — Guidelines for the assessment of information security controls. International Organization for Standardization, Geneva, 2019.
5. AI Penetration Testing. EPAM SolutionsHub. URL: https://solutionshub.epam.com/blog/post/ai-penetration-testing.

6. What is Manual Penetration Testing? A Complete Guide. OP Innovate - Premium Application Penetration testing and Incident Response. URL: https://op-c.net/blog/manual-penetration-testing.
7. OpenAI. GPT-4 API Technical Reference. URL: https://platform.openai.com/docs/overview
8. Hack The Box Documentation – Redeemer VM Description. URL: blob:https://app.hackthebox.com/4e68e09b-c17e-4442-91f3-0d292af10880

УДК 004.056.5(045)

О.В. Кручінін[1], М.О. Куць[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОЦІНКА ЦИФРОВОЇ ІДЕНТИЧНОСТІ ЯК ВРАЗЛИВОСТІ ІКС

Анотація. Досліджено проблему неконтрольованого накопичення цифрової ідентичності у відкритому доступі. Розглянуто методологію OSINT як інструмент збору даних. Проведено аналіз сучасних кіберзагроз, що базуються на цифровому сліді, та доведено їхню релевантність через статистичні дані звітів з кібербезпеки.

***Ключові слова**: цифрова ідентичність, OSINT, розвідка з відкритих джерел, кібербезпека, соціальна інженерія, фішинг, цифровий слід.*

Вступ. На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій кожна взаємодія людини з онлайн-середовищем генерує дані. Саме ця інформація є об'єктом для розвідки з відкритих джерел (OSINT). Сукупність цих даних формує «цифрову ідентичність» особи, яка, на відміну від контрольованих ідентифікаторів, накопичується стихійно і є публічною. Проблема полягає в тому, що цей неконтрольований цифровий слід створює суттєву, але часто неочевидну, загрозу безпеці для ІКС.

Постановка задачі. Більшість користувачів, які є невід’ємною частиною ІКС, не усвідомлює, який обсяг їх, здавалося б, приватної інформації вже є публічним і як він може бути використаний зловмисниками. Існує розрив між розумінням OSINT як інструменту спецслужб та його реальним застосуванням у поширених кібератаках.

Метою даної роботи є аналіз загроз шляхом встановлення прямого зв'язку між неконтрольованою цифровою ідентичністю та найпоширенішими векторами кібератак, що спираються на методологію OSINT.

Основний зміст роботи. Для розуміння, як саме цифрова ідентичність стає вектором загроз, необхідно розглянути два ключових поняття: методологію збору (OSINT) та об'єкт атаки (цифрову ідентичність).

Розвідка з відкритих джерел (OSINT) – це некласифікована інформація, яку цілеспрямовано виявляють, відбирають, узагальнюють і поширюють серед визначеної аудиторії для відповіді на конкретне запитання. Це системний процес, що включає стандартизовані етапи (цикл OSINT):

– підготовка (Preparation): визначення цілі та необхідної інформації;
– збір (Collection): збирання даних з усіх можливих джерел (репозиторії, соцмережі, архіви, ЗМІ, публічні записи);
– обробка (Processing): систематизація та впорядкування зібраних даних;
– аналіз (Analysis): інтерпретація даних, виявлення закономірностей та зв'язків;
– поширення (Dissemination): формування кінцевого звіту (профілю цілі).

При цьому збір даних поділяється на пасивний (використання пошукових систем, відкритих профілів, архівів – ціль не знає про спостереження) та активний (надсилання запитів у друзі, коментування, вступ до закритих груп – пряма взаємодія з ціллю).

Джерелами для збору даних, що формують цифрову ідентичність, виступають:

– соціальні мережі (SOCMINT): професійні (LinkedIn – посада, місце роботи, колеги, технологічний стек) та особисті (Facebook, Instagram, X – інтереси, члени родини, геолокаційні мітки, час активності);

– публічні реєстри: дані про ФОП, нерухомість, судові рішення, зареєстровані домени;

– витоки даних (Breach Compilations): сервіси на кшталт Have I Been Pwned або DeHashed, які за email чи нікнеймом дозволяють побачити список сервісів, де особа була зареєстрована, а іноді – і скомпрометовані паролі;

– форуми та веб-сайти: коментарі, публікації, резюме, де особа могла випадково залишити свій email, номер телефону або іншу чутливу інформацію.

Наразі розрізняють дві групи даних:

– пошук ідентифікаційних даних: реєстраційна інформація, електронна пошта, ім'я користувача, паролі, телефонні номери, поштова адреса, додаткові персональні дані, мультимедійні дані, соціальні зв’язки та поведінкові дані;

– технічна розвідка: ненавмисно оприлюднені дані, дані мережевої інфраструктури, мережеві сканери, інструменти тестування веб-застосунків, сканери вразливостей.

Етап аналізу в OSINT є не просто процесом накопичення даних, а встановлення зв'язків. Наприклад, нікнейм з ігрового форуму пов'язується з email, далі ця адреса перевіряється через витоки даних, що дає список сервісів, де особа зареєстрована; один з цих сервісів – LinkedIn, де підтверджується реальне ім'я та місце роботи. Таким чином, з розрізнених і, на перший погляд, нешкідливих фрагментів даних створюється цілісний, деталізований профіль кожної особи.

Цифрова ідентичність (Digital Identity) є об'єктом, на який спрямована ця методологія. Це широке поняття, що охоплює всі дані про особу, які зберігаються в інформаційному просторі. Як зазначає Токарев В.О., у цифровому середовищі фізична особа діє через свою проекцію, зміст якої становить сукупність інформації про особу в цифровому просторі, а саме: персональні дані,

цифровий слід, цифрову репутацію та інформацію про будь-які вчинені дії, навіть видалені [3].

M. Walkow та D. Pöhn додають, що розвиток інтернет-сервісів призвів до появи множинних цифрових ідентичностей, дані яких формують багатовимірну структуру, що охоплює персональну інформацію, облікові дані, соціальні зв'язки та технічні сліди [4]. Міжнародна ініціатива Identification for Development (ID4D) трактує поняття «цифрова ідентичність» як набір електронно зафіксованих і збережених атрибутів та/або облікових даних, які однозначно ідентифікують кожну особу [5].

Таким чином, під цифровою ідентичністю розуміється сукупність даних, створених у процесі взаємодії особи з онлайн-середовищем, які дозволяють унікально ідентифікувати її в інформаційному просторі.

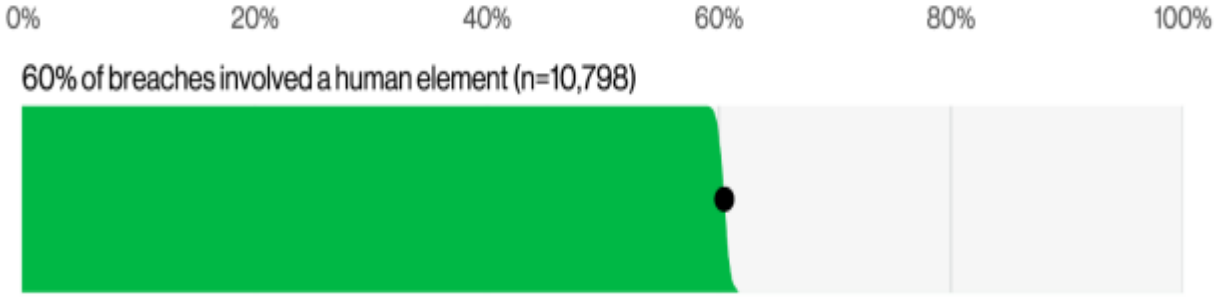


Рис. 1. Відсоток залученості людського фактору у кіберінцидентах

Переходячи до аналізу загроз, варто зазначити, що найслабшою ланкою в кібербезпеці залишається людина. Згідно з авторитетним звітом Verizon «2025 Data Breach Investigations Report», людський фактор був залучений у 60% всіх проаналізованих кіберінцидентів [6].

Саме методологія OSINT (етапи збору та аналізу) дозволяє перетворити розрізнені дані цифрової ідентичності з відкритих джерел на дієвий інструмент для атаки методами соціальної інженерії.

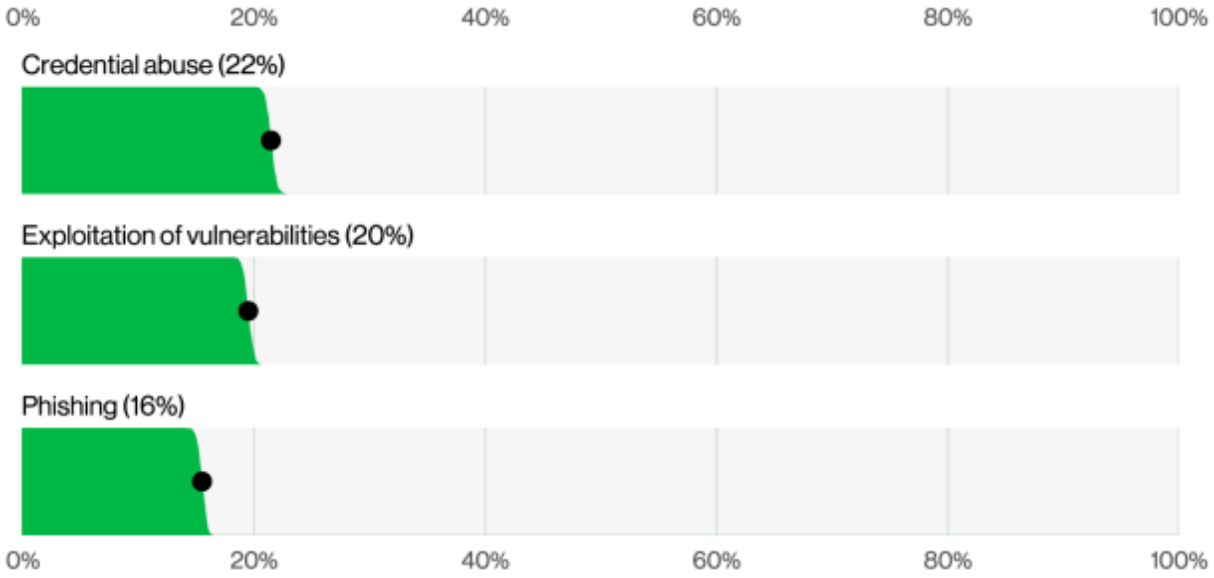


Рис. 2. Частка початкових векторів доступу у проаналізованих кіберінцидентах

Це ж дослідження надає ще один ключовий аргумент, говорячи про те, що хоча «фішинг», як початковий вектор атаки займає третє місце, поступаючись місцем «експлуатації вразливостей» та «використання викрадених облікових даних», але як зазначають самі автори, часто неможливо відстежити джерело цих даних, і завжди є ймовірність, що вони походять з попереднього інциденту з фішингом, який залишився непоміченим [6].

Саме тут простежується пряма загроза від неконтрольованої цифрової ідентичності. Дані, зібрані за допомогою OSINT (інформація про місце роботи, колег, особисті інтереси), дозволяють зловмисникам відмовитися від масових атак на користь цільового фішингу (spear-phishing). Таким чином, хоча сам фішинг у звіті посідає нижчу сходинку, він фактично виступає головним інструментом для отримання облікових даних, які потім стають найголовнішим вектором атак.

Окрім атак, спрямованих безпосередньо на користувача (соціальна інженерія, фішинг), зібрані дані цифрової ідентичності формують ще один вектор загрози. Він полягає у використанні цих даних для компрометації процесів ідентифікації особи та відновлення її доступу. Зловмисник, зібравши за допомогою OSINT достатній обсяг персональних даних (дівоче прізвище матері, ім’я першої домашньої тварини, пам’ятні дати, місце народження), отримує можливість успішно пройти процедури ідентифікації особи. Це дозволяє йому обійти системи безпеки, наприклад, скинути пароль від банківського чи поштового акаунту, прикинувшись легітимним власником.

Висновки. Проведений аналіз доводить, що неконтрольована цифрова ідентичність у відкритому доступі може бути використана, як вразливість для реалізації наступних етапів атак на ІКС. Вона надає зловмисникам необхідні дані, які, за допомогою системної методології OSINT, використовуються для

проведення успішних атак соціальної інженерії. Це, у свою чергу, призводить до компрометації облікових даних – головного початкового вектору кібератак у 2025 році. Окрім цього, зібрані дані також створюють ризики для процесів ідентифікації особи.

Це вказує на необхідність в подальших дослідженнях та розробці структурованих методів, які б дозволили проводити проактивний аудит цифрового сліду. Своєчасне виявлення та мінімізація публічної інформації є важливим кроком для реального зниження ризиків кібербезпеки як для окремих осіб, так і для організацій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Archive: NATO OSINT Handbook. URL: https://archive.org/details/NATOOSINTHandbookV1.2/page/n5/mode/2up.
2. SANS Institute: What is Open-Source Intelligence? URL: https://www.sans.org/blog/what-is-open-source-intelligence.
3. Archive: ЩОДО ПИТАННЯ ЦИФРОВОЇ ІДЕНТИЧНОСТІ У МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ. URL: http://pp-law.in.ua/archive/4_2022/6.pdf.
4. Arxiv: Systematically Searching for Identity-Related Information in the Internet with OSINT Tools. URL: https://arxiv.org/pdf/2407.16251.
5. ID4D: Glossary. URL: https://id4d.worldbank.org/guide/glossary.
6. Verizon: 2025 Data Breach Investigations Report. URL: https://www.verizon.com/business/resources/Tea/reports/2025-dbir-data-breach-investigations-report.pdf.

УДК 004.056:621.391

В.Ю. Каштан[1], В.В. Гнатушенко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АДАПТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ ICMP-ТРАФІКУ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ DDOS-АТАКАМ У СУПУТНИКОВИХ КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Анотація. Запропоновано підхід адаптивної фільтрації ICMP-трафіку в супутникових каналах зв’язку, який обмежує надлишкові запити на основі статистичного аналізу, забезпечуючи блокування підозрілих IP-адрес. Експериментальні дослідження показали ефективність підходу у збереженні пропускної здатності каналів та підтриманні високої якості обслуговування користувачів під час DDoS-атак.

***Ключові слова**: супутникові канали зв’язку, DDOS-атаки, ICMP-трафік, фільтрація.*

Вступ. Розвиток технологій супутникового зв’язку та їх інтеграція зі стільниковими мережами п’ятого покоління (5G) зумовлюють потребу у забезпеченні кіберзахисту. Така взаємодія забезпечує розширення покриття та підвищення доступності зв’язку, проте супроводжується новими викликами в

сфері кіберзахисту. Однією з головних загроз залишаються розподілені атаки відмови в обслуговуванні (DDoS-атаки), спрямовані на перевантаження мережевих ресурсів, зокрема через експлуатацію протоколу ICMP як засобу порушення комунікацій між вузлами системи. Такі атаки, зокрема шляхом масового надсилання ICMP echo (ping), можуть затоплювати супутникові канали зв'язку, спричиняючи перевантаження транспондерів і блокування обміну даними між вузлами мережі, що негативно впливає на доступність і якість сервісів, керування мережею та її стійкість [1].

Метою роботи є розробка й оцінка підходу адаптивної фільтрації ICMP-трафіку для мінімізації впливу DoS/DDoS-атак у супутникових каналах передачі даних із забезпеченням безперервності зв'язку та якості обслуговування користувачів. Зокрема, передбачається створення механізму динамічного обмеження кількості запитів ICMP, що надходять до наземних станцій, із можливістю автоматичного коригування порогових значень залежно від поточного стану мережі.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- проаналізувати характер і наслідки атак типу «Відмова в обслуговуванні» у супутникових мережах, визначити найбільш уразливі компоненти інфраструктури, зокрема наземні станції та центри керування;
- дослідити особливості трафіку протоколу ICMP у нормальному та аномальному режимах роботи, виокремити індикатори, за якими можна виявляти перевантаження мережі;
- розробити алгоритм адаптивної фільтрації ICMP-трафіку, який забезпечує гнучке регулювання швидкості оброблення запитів залежно від поточного навантаження каналу зв'язку;
- побудувати модель супутникової мережі з урахуванням можливості імітації атак різної інтенсивності та оцінити ефективність запропонованого методу за показниками продуктивності та стійкості до перевантажень;
- провести порівняльний аналіз результатів моделювання з традиційними статичними методами обмеження трафіку, визначити переваги запропонованого підходу.

Основний зміст роботи. У контексті атак відмови в обслуговуванні, супутникові канали зв'язку є вразливими до трьох основних їх форм: флудів за типом обслуговування, SYN-флудів і ping-флудів [2-4]. Зокрема, ping-флуди базуються на масовій генерації ICMP-запитів з різних джерел, що призводить до повного або часткового припинення доступу до мережевих ресурсів. Ефект таких атак посилюється через підвищену затримку сигналу та широкомовний характер передавання даних, що особливо є важливим для систем реального часу, таких як голосовий зв'язок або передавання телеметричних даних [5]. Одним із рішень для запобігання атакам відмови в обслуговуванні є повне вимкнення протоколу ICMP у мережевих об'єктах, підключених через супутникові канали [6]. Однак

такий підхід має суттєві обмеження. Деактивація ICMP призводить до втрати низки критично важливих функцій, зокрема діагностичних та керувальних механізмів мережі. Наприклад, вимкнення ICMP позбавляє систему можливості повідомляти про помилки доставки пакетів та використовувати протокол ICMP Router Discovery Protocol, необхідний для виявлення активних маршрутизаторів у мережі. Крім того, навіть за вимкненої функціональності ICMP на маршрутизаторах, зловмисник може спричинити перевантаження пропускної здатності супутникового каналу, якщо протокол ICMP залишається активним на будь-якому іншому підключеному пристрої. У цьому випадку будь-який віддалений вузол із активним ICMP може стати джерелом масових ping-запитів, що призводять до перевищення доступних ресурсів каналу та зниження якості обслуговування користувачів.

Запропонований у роботі підхід ґрунтується на концепції адаптивного обмеження швидкості ICMP-з'єднань. Його суть полягає у контролі кількості ICMP-запитів, які кожен мережевий об'єкт може надсилати або отримувати протягом визначеного інтервалу часу, встановленого на основі статистичного аналізу нормальної інтенсивності трафіку. На першому етапі здійснюється моніторинг нормальної поведінки мережі, що передбачає визначення середнього обсягу ICMP-запитів, які обробляються у звичайному режимі без впливу атак. Отримані статистичні параметри формують еталон профілю допустимого трафіку. На основі цього профілю виконується виявлення аномалій – перевищення середнього порогу або відхилення від характерних закономірностей ICMP-обміну розцінюється як потенційна атака, і відповідні пакети блокуються.

Для розрахунку порогових значень використовується оцінка середньої кількості ICMP-запитів, які може обробити мережевий вузол протягом певного інтервалу часу. Ідентифікація об'єктів здійснюється за їх IP- або MAC-адресами, що дозволяє забезпечити коректне функціонування системи навіть у динамічному середовищі з часто змінюваними мережевими параметрами. Реалізація механізму здійснюється на рівні Центру мережевих операцій, де виконується централізований моніторинг ICMP-трафіку. У разі виявлення надмірної кількості запитів від певного вузла або вхідних потоків від зовнішніх джерел, маршрутизатори NOC здійснюють їх блокування. Така схема може бути масштабована й застосована не лише на рівні центрального вузла, але й у віддалених сегментах мережі.

Запропонований підхід дозволяє ефективно протидіяти двом основним сценаріям ICMP-флудингу. Перший сценарій передбачає масове надсилання ICMP-запитів від центрального вузла до різних наземних станцій, що перевантажує канали зв'язку; система блокує як надлишкові запити, так і відповіді від станцій. Другий сценарій стосується атак із використанням підроблених мережевих пристроїв, які надсилають велику кількість ICMP-запитів до цільового вузла наземної станції з метою перевантаження її обчислювальних ресурсів. У такій ситуації адаптивний фільтр блокує підозрілі

пакети на рівні NOC, запобігаючи передачі відповідей до підроблених джерел. Важливо, що механізм блокування поширюється виключно на IP-адреси, які демонструють ознаки шкідливої активності, не впливаючи на нормальний користувацький трафік. Це дозволяє забезпечити високий рівень захисту без зниження ефективності роботи мережі.

Таким чином, запропонований підхід адаптивної фільтрації ICMP-трафіку дає змогу мінімізувати ризики перевантаження супутникових каналів, зберегти стабільність мережевої інфраструктури та підтримати необхідний рівень якості обслуговування користувачів навіть за умов активних DDoS-атак.

Для дослідження ефективності адаптивної фільтрації ICMP-трафіку була використана модель супутникової мережі, реалізована у середовищі ns-3 (Network Simulator 3). Обраний симулятор дозволяє точно моделювати характеристики супутникового зв'язку, такі як підвищена затримка сигналу, обмежена пропускна здатність каналу та можливість керування чергами пакетів. Для перевірки ефективності запропонованого підходу використано сценарій ICMP-флудингу (Ping Floods). Модель мережі містила центральний операторський вузол та віддалені станції GS1, GS3, GS4, між якими імітувався типовий приклад супутникового зв'язку з характерними затримками та обмеженою смугою пропускання. Початковий період симуляції використовувався для збору еталонних статистик нормальної поведінки трафіку, на основі яких формувалися порогові значення для механізму фільтрації. Атака моделювалася наступним чином, у момент часу $t \approx 4.5$ хвилини один із центральний операторський вузол починав посилений генератор ICMP Echo-запитів до віддалених станцій (GS1, GS3, GS4). Додаткові серії експериментів передбачали модифікацію поля «Source IP» в IP-заголовках (IP-спуфінг) з метою маскування реального джерела трафіку та штучного збільшення навантаження на ресурси приймаючих вузлів. Під час симуляцій велися детальні дані трафіку, що включали: кількість відправлених і отриманих ICMP-запитів та відповідей; рівень втрат пакетів; зміни RTT; завантаження процесора та пам'яті вузлів; число одночасних з'єднань; а також інші метрики, необхідні для кількісної оцінки впливу атаки на якість обслуговування станцій.

На рис.1 представлено відсоток втрат пакетів на центральному операторському вузлу в умовах нормальної роботи мережі, під час моделювання DDoS-атаки та при застосуванні механізму мінімізації атак. Під час нормальної роботи мережі втрати пакетів залишаються у межах 0,2-0,5 %, що підтверджує стабільність супутникового каналу зв'язку за відсутності атак. У разі моделювання DDoS-атаки (масова генерація ICMP-запитів із скомпрометованого вузла) відсоток втрат пакетів зростає починаючи з 4,5 хвилини та досягає понад 60 % до кінця періоду спостереження. Такий рівень втрат свідчить про повне блокування доступу до мережевих ресурсів для трафіку та істотне зниження якості обслуговування користувачів. Застосування запропонованого підходу адаптивної фільтрації ICMP-трафіку дозволяє зберегти стабільність роботи мережі під час активної атаки. Відповідно до даних графіка, втрати пакетів після

активації фільтра залишаються близькими до значень у нормальному режимі (менше 0,5 %), що свідчить про ефективну блокаду надлишкових ICMP-запитів та відновлення пропускної здатності каналу. Таким чином, експериментальні дослідження демонструють, що адаптивна фільтрація ICMP-трафіку дозволяє мінімізувати вплив DDoS-атак на супутникові канали, забезпечуючи безперервність зв'язку та збереження належної якості обслуговування користувачів.

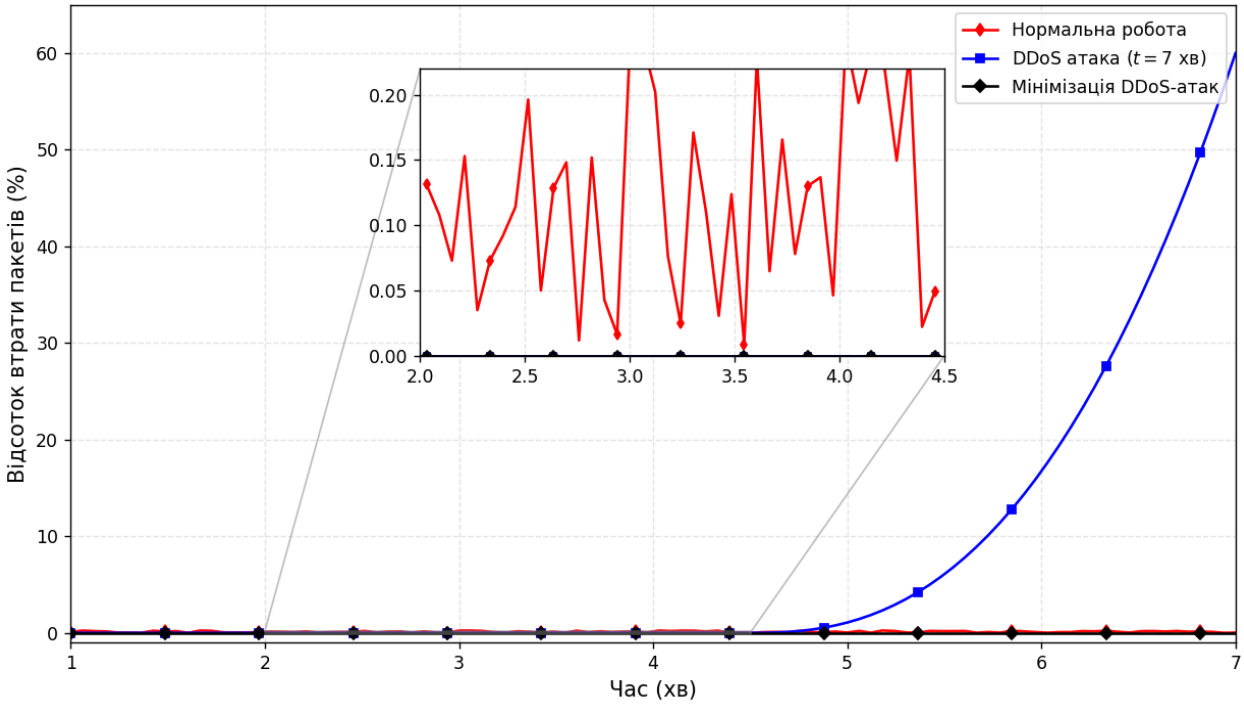


Рис. 1. Відсоток втрати пакетів на моделі супутникового зв'язку під час і без DDoS-атак

Наукова новизна полягає у розробці підходу адаптивної фільтрації ICMP-трафіку, який на основі статистичного аналізу поведінки мережі та експоненційно зваженого рухомого середнього автоматично визначає порогові значення для обмеження надлишкового трафіку. Запропонований підхід дозволяє блокувати підозрілі IP-адреси за умов інтенсивних DDoS-атак.

Висновки. В результаті було запропоновано підхід адаптивної фільтрації ICMP-трафіку, що дозволяє ефективно протидіяти DDoS-атакам у супутникових каналах зв'язку, знижуючи втрати пакетів та зберігаючи пропускну здатність каналів. Механізм обмежує надлишкові запити на основі статистичного аналізу, блокуючи лише підозрілі джерела і підтримуючи нормальний трафік користувачів. Імітаційне моделювання у ns-3 підтвердили практичну ефективність підходу, забезпечуючи безперервність зв'язку та необхідний рівень якості обслуговування.

Доповідь підготовлено в рамках проєкту 2025.06/0047 «Інформаційні технології криптографічного захисту й автентифікації даних для систем

мобільного та супутникового зв'язку». Проєкт фінансується Національним фондом досліджень України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Xiao Y, Liu J, Shen Y, Jiang X, Shiratori N. Secure Communication in Non-Geostationary Orbit Satellite Systems: A Physical Layer Security Perspective. IEEE Access 2019;7:3371–3382.
2. Shotts William. The Linux command line. 2nd ed. San Francisco : No Starch Press, 2019. 502 p.
3. Li Y, An K, Liang T, Yan X. Secrecy Performance of Land Mobile Satellite Systems With Imperfect Channel Estimation and Multiple Eavesdroppers. *IEEE Access* 2019;7:31751–31761.

УДК 621.39

В.І. Корнієнко[1], І.А. Пащенко[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В АСУ ТП НАФТОГАЗОВОГО РОДОВИЩА

Анотація. Розглянуто дослідження та впровадження адаптивних алгоритмів управління мережевими трафіками, які оптимізують передачу даних між об'єктами нафтогазового виробництва. Запропонована структурна схема системи передачі, досліджені методи збільшення пропускної здатності мережі взаємодії об'єктів кущового майданчика та обладнання зв'язку, розроблено алгоритм передачі даних на основі протоколу DNP 3, оцінена ефективність роботи запропонованого алгоритму. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленого алгоритму для забезпечення стабільної роботи нафтогазової інфраструктури, зниження термінів окупності нових технологій та підвищення ефективності управлінських процесів.

***Ключові слова**: система передачі, адаптивний алгоритм, протокол DNP3, стандарт зв'язку IEC-60870-5-104, пропускна здатність.*

Вступ. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління мережевими трафіками передачі даних у нафтогазовому виробництві, що є критично важливим для стабільної роботи та безпеки об'єктів галузі.

Тому метою роботи є дослідження та впровадження адаптивних алгоритмів управління мережевими трафіками, які оптимізують передачу даних між об'єктами нафтогазового виробництва.

Постановка задачі. Кущовий майданчик в нафтогазовій галузі є ключовим елементом для організації процесів видобутку нафти та газу. Він включає необхідну технічну інфраструктуру для збору, обробки та передачі даних. Основною метою створення системи є забезпечення ефективного управління технологічними процесами на кущових майданчиках, зокрема оптимізація передачі даних, зменшення затримок та підвищення надійності

зв’язку між компонентами мережі. Адаптивні алгоритми управління передачею відіграють важливу роль у досягненні цих цілей, оскільки автоматично регулюють параметри передачі даних в залежності від змін у мережевих умовах. АСУ ТП повинна забезпечити стабільність, безпеку та ефективність роботи технологічних процесів, включаючи передачу даних у реальному часі, що дозволяє стабільно функціонувати майданчику.

Об’єктом дослідження в роботі є промислові мережі передачі даних нафтогазового виробництва, а предметом – адаптивні алгоритми управління мережевими трафіками.

Задачі роботи включають:

- розробку структурної схеми взаємодії об'єктів кущового майданчика та обладнання зв'язку;
- дослідження методів збільшення пропускної здатності мережі;
- розробку алгоритму передачі даних на основі протоколу DNP 3;
- оцінку ефективності роботи запропонованого алгоритму.

Основний зміст роботи. Система передачі технологічних даних (технологічна мережа) повинна бути фізично або логічно розділена з системою передачі виробничих даних (виробнича мережа). У разі логічного поділу для технологічної мережі має бути виділений логічний канал із гарантованою смугою пропускання даних. Технологічна мережа повинна працювати лише для передачі технологічних даних і управління технологічними процесами. Для розподілених об’єктів, де роздільна передача технологічних даних ускладнена або неможлива, допускається використовувати, в обґрунтованих випадках, суміщений канал передачі даних.

Протокол DNP 3 – сучасний комунікаційний протокол розподілених систем контролю та керування [1]. Сервіс SCADA Pack E RTU може підтримувати кілька майстер-користувачів DNP3, відповідно до яких кожен провідний DNP3 ідентифікується як користувач RTU щодо основної адреси DNP.

Робота протоколу DNP3 SCADA Pack E RTU за протоколом TCP/IP відповідає вимогам групи користувачів DNP “Транспортування DNP3 over Loca land Wide Area Networks” [1, 2]. Призначений номер порту TCP і UDP “20000” використовується для зв’язку DNP3. В RTU для зв’язку DNP3 встановлюється приймач сокетів UDP та прослухується сокет TCP. Вибрані сокети встановлюються параметром “Default DNP3 Port”. Комунікація сокетів UDP та TCP може бути активна одночасно, а кілька зовнішніх пристроїв TCP/IP можуть одночасно запитувати підключення до сокету TCP або надсилати дейтаграми в UDP-сокет. Обробка та обмін PPP-TCP/IP через локальну область та широку область мережі можуть ввести додаткові затримки під час транспортування кадрів DNP3.

Протягом розвитку мережевих технологій стандарт IEC 60870-5 став передбачати використання протоколу TCP/IP. Особлива увага варта стандарту (протоколу) IEC 60870-5-104 [4], драйвер для якого є ISaGRAF. Його правила є комбінацією прикладного рівня стандарту IEC 60870-5-101 та функцій

транспортного рівня, що передбачаються TCP/IP. Всередині TCP/IP можуть бути використані різні типи мереж, включаючи Ethernet 802.3, X.25, FR (Фрейм реле), ATM (Режим асинхронної передачі) та ISDN (Цифрова мережа інтегрованого обслуговування), як показано на рис. 1.

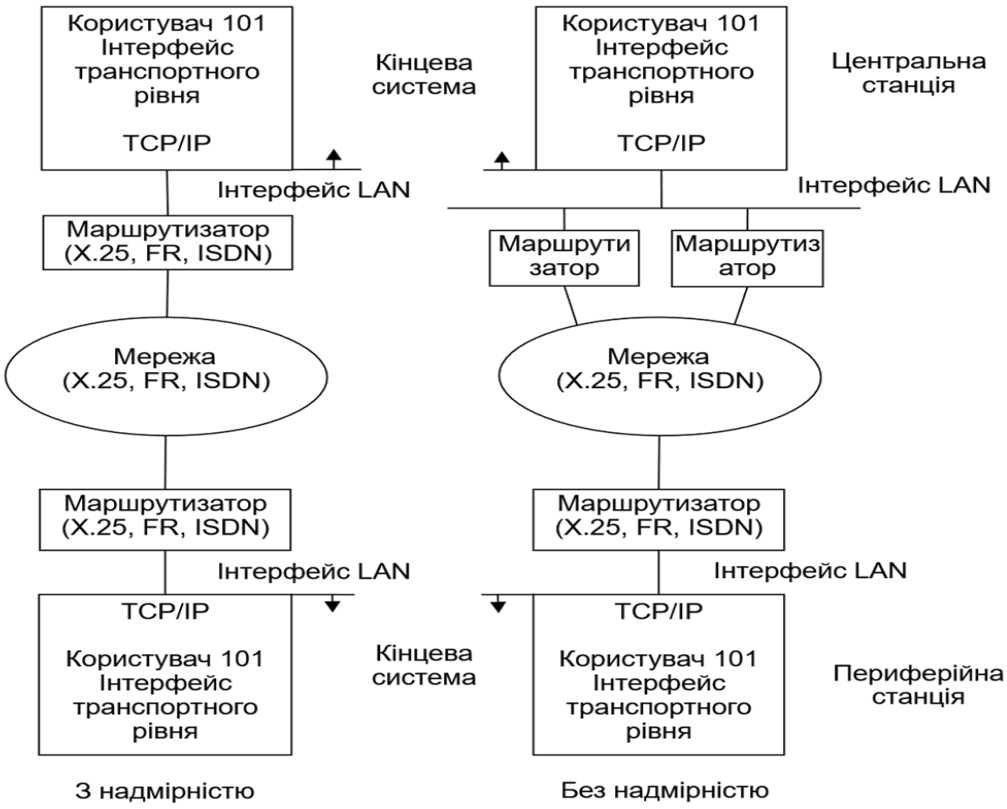


Рис. 1. Структура системи передачі на базі стандарту IEC 60870-5-104

Реалізація адаптивного алгоритму на базі протоколу IEC 60870-5-104 в ISaGRAF здійснюється в середовищі інструментальної системи програмування контролерів ScadaPACK E334. Драйвер IEC 60870-5-104 підтримує Slave складову протоколу, у тому числі циклічну, фонову та спорадичну передачу даних. Налаштування всіх параметрів драйвера здійснюється через файл XML. Конфігурація драйвера виконується безпосередньо в середовищі ISaGRAF Workbench через діалогове вікно «Монтаж ВР/Вибір Пристрою», де знаходиться список простих пристроїв ISaGRAF.

Реалізовані функції прикладного рівня: віддалена ініціалізація вторинної станції, циклічна передача даних, процедура читання, спорадична передача, опитування станції (загальний та за групами), синхронізація часу, кілька команд прямої передачі команд, повний набір команд передачі інтегральних сум, процедура тестування, фонове сканування. У всіх випадках для TCP/IP зв’язку між станціями використовується порт 2404. Як первинна складова (Master) протоколу IEC 60870-5-104 можуть використовуватися різні продукти, наприклад, Cyb Server (Cybectec).

На вхід алгоритму, реалізованого у програмному середовищі Stateflow [5], подаються ретроспективні дані нафтовидобувного підприємства. Модель програми послідовно для кожного параметра оцінює динаміку їх змін та порівнює ці значення з величинами апертур відповідно заданих для кожного параметра. Потім, залежно від динаміки змін, алгоритм формує блок даних. У масив даних блоку записуються: тег параметра, поточне значення параметра та мітка часу вимірювання. На етапі обробки результатів кожного з параметрів формується двомірний масив. У першому стовпці вказується час, коли параметр перевищив апертуру, тоді як у другому відповідно сама величина у цей час. Потім за отриманими даними за допомогою апроксимації (з періодом 0,001с) формується тренд, який бачитиме диспетчер у себе на екрані.

Відповідно до отриманих результатів спостерігається кореляція між динамікою сигналу та точністю обробки алгоритму. Для об’єктів з високою динамікою алгоритм згладжує пікові значення, тим самим ініціалізуючи алгоритми захисту заздалегідь, що може призвести до помилкових спрацьовувань систем захисту та інших автоматичних алгоритмів, пов’язаних із цим параметром. Для більш детальної оцінки впливу похибки на технологічний процес було проведено низку експериментів з розрахунком відносної та абсолютної похибок.

Аналіз отриманих результатів показує, що алгоритм із високою точністю (відносна похибка менше 1%) обробляє вихідні дані, використовуючи адаптивний алгоритм. Тим самим дослідження дозволяють впровадити проєктне рішення у діючі об’єкти нафтогазовидобутку, після етапу колективної опрацювання технічного рішення з провідними спеціалістами технологів, проєктувальників, метрологів, зв’язківців та отримання дозволу на експлуатацію.

Наукова новизна роботи полягає в розробці адаптивного алгоритму передачі даних на основі протоколу DNP 3, що є важливим для підвищення ефективності та стабільності роботи системи управління трафіком за рахунок підвищення пропускної здатності промислової мережі зв’язку.

Висновки. У процесі виконання дослідження адаптивних алгоритмів управління мережевими трафіками передачі даних у нафтогазовому виробництві була розроблена структурна схема взаємодії об'єктів кущового майданчика та обладнання зв'язку, що забезпечує оптимізацію передачі даних у складних умовах промислових мереж.

Основним напрямом дослідження стало збільшення пропускної здатності мережі шляхом застосування блокової спорадичної передачі на основі протоколу DNP 3, що дозволяє ефективно організувати передачу даних з урахуванням специфіки нафтогазової галузі. Алгоритм передачі з протоколом DNP реалізовано в середовищі Simulink.

Запропоновані рішення дозволяють підвищити швидкість обробки даних, що в свою чергу забезпечує своєчасне прийняття рішень для попередження аварійних ситуацій, що є критичним для стабільної роботи нафтогазового

виробництва. Крім того, покращення в управлінні даними дозволить збільшити термін служби обладнання, підвищити якість роботи автоматичних систем управління та знизити терміни окупності інвестицій у нові технології.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Communication Protocol 630 series DNP3 Manual [Електрон. Ресурс] / Спосіб доступу: URL: https://library.e.abb.com/public/3888218bfd15b1e2c1257b130056c893/RE_630_dnpprot_756789%20_ENa.pdf.
2. IEEE 802.11 WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS [Електрон. ресурс] / Спосіб доступу: URL: https://www.ieee802.org/11.
3. ДСТУ ISO/IEC 7498-1:2004 Інформаційні технології. Взаємозв'язок відкритих систем. Базова еталонна модель. Частина1. Еталонна модель.
4. Display frequency spectrum - Simulink. MathWorks - Makersof MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink [Електрон. ресурс] / Спосіб доступу: URL: https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/spectrumanalyzer.html.

УДК 004.056:004.414.3

О.В. Кручінін[1], М.Ю. Зубков[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ВИМОГ СТАНДАРТІВ БЕЗПЕКИ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Анотація. Описано процес збору вимог до програмного забезпечення для його подальшої розробки. Покращення досягається за рахунок комплексного підходу до процесу збору та аналізу вимог до програмного забезпечення.

***Ключові слова**: ISO 27000, GDPR, PCI DSS, збір вимог, функціональні вимоги, вимоги безпеки, нефункціональні вимоги, програмне забезпечення, розробка програмного забезпечення, SDLC.*

Вступ. Сьогодні безліч програмних застосунків пронизує практично всі аспекти нашого життя. Вони слугують сховищами критично важливих даних (зокрема банківської, медичної та конфіденційної інформації) й одночасно контролюють нашу щоденну діяльність. У такому контексті атрибути безпеки програмного забезпечення набувають особливої ваги, адже саме вони визначають здатність програмних систем ефективно протистояти загрозам та мінімізувати наслідки кібератак. Тривожна статистика Звіту про спостереження за безпекою додатків Contrast Security за 2020 рік демонструє, що 96% веб-додатків містять вразливості, а 26% мають серйозні проблеми безпеки. Додатково звіти CISQ (Consortium for Information and Software Quality) підкреслюють стійку тенденцію до зростання кількості кібератак та пов'язаних з ними витрат для світової економіки. Усе це робить забезпечення безпеки

програмного забезпечення критично важливим завданням, яке привертає дедалі більшу увагу як в академічних колах, так і в індустрії.

Постановка задачі. У межах даної роботи ставиться такі задачі:

- оцінити вплив міжнародних стандартів інформаційної безпеки та регуляторних вимог на процес розробки програмного забезпечення.
- проаналізувати, які вимоги до безпеки формують зазначені стандарти на різних етапах життєвого циклу ПЗ;
- дослідити, як інтеграція цих вимог змінює процеси збору та аналізу вимог, проектування архітектури, розробки та тестування;
- оцінити вплив дотримання/недотримання стандартів на вартість, строки розробки та рівень ризиків (витоки даних, штрафи, репутаційні втрати);
- на основі отриманих результатів сформувати практичні рекомендації щодо вбудовування вимог стандартів безпеки в процес інженерії вимог і розробки ПЗ на ранніх стадіях SDLC.

Основний зміст роботи. Вимоги безпеки (ВБ) визначають необхідний рівень захисту програмного забезпечення (ПЗ) чи систем від таких загроз, як несанкціонований доступ, витоки даних та різні форми кібератак. Формулювання чітких, вичерпних та практично застосовних ВБ на початку програмного проекту є ключовою передумовою побудови надійної та стійкої до загроз системи. Саме ці вимоги спрямовують процеси проєктування, розробки та тестування безпеки, у підсумку зміцнюючи захищеність кінцевого програмного продукту.

Втім, на практиці під час розробки ПЗ, як правило, пріоритет віддається функціональним вимогам (ФВ) – тим, що детально описують, що саме має робити система. Вимоги безпеки часто розглядаються як другорядні: під час аналізу вимог аналітики зазвичай зосереджуються на функціональності продукту, тоді як ВБ або відсуваються на пізні етапи проєкту, або, що ще гірше, залишаються на пост-релізну фазу. Такий підхід призводить до однієї з найпоширеніших проблем – нездатності належним чином охопити критично важливі вимоги безпеки.

Причин цьому щонайменше дві. По-перше, ВБ часто розглядаються ізольовано від загального процесу розробки вимог, що сприяє ігноруванню важливих функцій безпеки.

По-друге, існує суттєвий розрив у знаннях між інженерами з вимог, яким може бракувати глибокої експертизи в галузі кібербезпеки, та фахівцями з безпеки, котрі, зі свого боку, не завжди повною мірою обізнані з архітектурою та деталями конкретної системи. Це ще більше підвищує ризик пропуску важливих ВБ. Не випадково неповні та/або приховані вимоги вважаються однією з найчастіших проблем у галузі, про що свідчать дані компаній з десяти країн та різних індустрій. У таких умовах автоматична генерація вимог безпеки на основі предметних знань з кібербезпеки, одразу після визначення функціональних вимог, стає фактично необхідною.

Зазвичай безпеку відносять до нефункціональних вимог, а отже, заходи безпеки нерідко впроваджуються на завершальних етапах життєвого циклу розробки ПЗ (SDLC). Водночас саме етап розробки вимог є критичним для формування безпечного програмного забезпечення й потребує високого рівня усвідомлення загроз безпеки. Проте рівень обізнаності інженерів з вимог щодо виявлення та формалізації ВБ залишається низьким. Якщо ж інженер з вимог приділяє достатньо уваги безпеці вже на ранніх стадіях, це істотно підвищує шанси створити дійсно захищену систему.

На практиці більшість інженерів з вимог стикаються з труднощами при отриманні вимог безпеки від ключових зацікавлених сторін. Часто виявляється, що сформульовані ВБ не повною мірою відповідають реальним очікуванням та потребам клієнтів. Унаслідок включення вимог безпеки на пізніх етапах процесу розробки ймовірність появи вразливостей суттєво зростає.

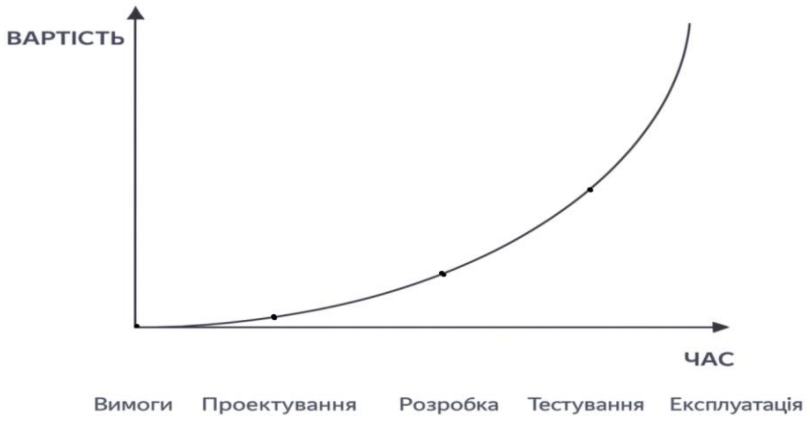


Рис. 1. Графік залежності вартості внесення змін від стадії проєкту.

Як видно з графіка на рис. 1.1, вартість внесення змін до програмного продукту експоненційно зростає зі збільшенням зрілості проєкту. Саме тому надзвичайно важливо виявити та почати впроваджувати ключові вимоги до ПЗ якомога раніше: реалізація цих вимог на завершальних стадіях може вимагати значних часових ресурсів і, відповідно, суттєвих фінансових витрат.

Це повною мірою стосується й вимог безпеки. Вони мають бути визначені вже на початкових стадіях проєкту, оскільки загальна архітектура системи може виявитися несумісною з необхідними стандартами безпеки. У такому разі буде потрібно переробляти значну частину функціоналу вже майже готового продукту. Особливо це актуально для проєктів, що працюють у сферах, де збирають, зберігають або обробляють чутливі дані: медичну, фінансову чи іншу конфіденційну інформацію.

У звіті про порушення безпеки в Каліфорнії за 2016 рік зазначено, що протягом останніх кількох років Генеральний прокурор штату отримав 657 повідомлень про інциденти, пов’язані з порушенням безпеки даних, які торкнулися 49 мільйонів каліфорнійців. У 2012 році було зареєстровано 131

випадок порушення безпеки, що призвів до витоку 2,6 мільйона записів жителів Каліфорнії. У 2015 році зафіксовано вже 178 порушень, які поставили під загрозу понад 24 мільйони записів. Це означає, що майже 60% населення штату зіштовхнулося з порушенням безпеки даних лише протягом одного 2015 року, переважно через збої у забезпеченні безпеки. Інші подібні випадки стосувалися витрат на усунення вразливостей та наслідків кібератак; згідно з оцінками Gartner, Inc., у 2018 році витрати, пов'язані із забезпеченням безпеки, становили 96,3 мільярда доларів. Більшість цих інцидентів і фінансових втрат пов'язані з недоліками в організації заходів безпеки та неповним врахуванням вимог безпеки на етапах виявлення й аналізу. Погано сформульовані ВБ негативно впливають на програмну систему з погляду вартості, часу, обсягу переробки та частоти змін вимог.

Важливу роль у формуванні вимог безпеки відіграють міжнародні стандарти та регуляції, які задають обов'язкові або де-факто обов'язкові рамки для проєктування та розробки захищених програмних систем. Сімейство стандартів ISO/IEC 27000, зокрема ISO 27001 та ISO 27002, визначає системний підхід до управління інформаційною безпекою, включно з політиками, процесами, контролями та механізмами захисту. Для прикладних систем це означає, що на етапі формування вимог мають бути передбачені такі аспекти, як управління доступом, шифрування даних, журналювання безпекових подій, резервне копіювання, управління вразливостями та інцидентами тощо. Зростання кількості сертифікатів ISO/IEC 27001, зафіксоване в щорічному ISO Survey, свідчить про стале поширення практики побудови формалізованих систем управління інформаційною безпекою в усьому світі. На цьому фоні ENISA у своїй серії ENISA Threat Landscape відзначає тисячі задокументованих інцидентів кібербезпеки щороку; зокрема, останні випуски охоплюють періоди, упродовж яких в ЄС було проаналізовано майже 4,9 тис. підтверджених інцидентів, що підкреслює масштаб загроз, на які мають відповідати стандартизовані підходи до безпеки.

Значний вплив на формулювання та пріоритезацію вимог безпеки, особливо для систем, що працюють із персональними даними громадян ЄС, має Загальний регламент про захист даних (GDPR). Цей регламент не лише встановлює суворі вимоги щодо захисту персональних даних, але й прямо вказує на необхідність реалізації принципів privacy by design та privacy by default. За другим звітом Єврокомісії щодо застосування GDPR 2024 р., у 19 державах-членах понад 70% респондентів знають про існування цього регламенту, що демонструє високий рівень обізнаності населення про свої права на захист даних. При цьому сукупна кількість штрафів за порушення GDPR невпинно зростає: за даними «GDPR Enforcement Tracker Report», станом на 1 березня 2025 року задокументовано понад 2000 штрафів на загальну суму приблизно 5,65 млрд євро. Окремі дослідження показують і стійко високий рівень інцидентів: наприклад, за оцінкою DLA Piper, у середньому фіксується понад 360 повідомлень про порушення безпеки персональних даних на день, що відображає

постійний тиск регуляторів на організації. З точки зору інженерії вимог це означає, що безпека та конфіденційність мають бути закладені в архітектуру додатка з перших кроків — шляхом визначення ВБ, пов'язаних із мінімізацією збору даних, псевдонімізацією та анонімізацією, контрольованим доступом, реалізацією прав суб'єктів даних і процедурами виявлення та повідомлення про інциденти.

Для фінансового сектору особливе значення мають стандарти платіжної індустрії, зокрема PCI DSS (Payment Card Industry Data Security Standard), який регламентує обробку, передавання та зберігання даних платіжних карток. Звіти Verizon Payment Security Report демонструють, що рівень сталої відповідності цьому стандарту залишається проблемним: у 2019 році лише близько 27,9% організацій, включених до вибірки, підтримували повну відповідність PCI DSS протягом усього періоду між аудитами, і це вже третій рік поспіль падіння показника, який з 2016 року зменшився більш ніж на 27 відсоткових пунктів. Для прикладних систем, що працюють із платіжною інформацією, це трансформується в конкретні ВБ: використання сильного шифрування, сегментація мережі, жорсткі вимоги до автентифікації та авторизації, регулярне сканування вразливостей і пенетраційне тестування, захист від шкідливого ПЗ, розмежування доступу до даних та журналів транзакцій тощо. Вбудовування цих положень у вимоги безпеки на ранніх етапах проєкту дає змогу уникнути дорогої переробки логіки опрацювання платежів та забезпечити відповідність аудиторським вимогам.

Аналогічно, у медичній сфері діють власні регуляції (наприклад, HIPAA у США та національні аналоги в інших країнах), які накладають додаткові зобов'язання щодо конфіденційності та цілісності медичних даних, контролю доступу до них, ведення аудиту дій користувачів і процесів обміну інформацією між системами. Статистика порушень у секторі охорони здоров'я демонструє масштаб проблеми: згідно з щорічним звітом HIPAA Journal, лише у 2024 році до офісу Міністерства охорони здоров'я та соціальних служб США (HHS OCR) було подано 725 повідомлень про великі витоки (500+ записів) – третій рік поспіль, коли кількість таких інцидентів перевищує 700, причому загальна кількість скомпрометованих записів перевищила 275 млн. Окремі інциденти, як-от масовий витік унаслідок атаки на Change Healthcare/UnitedHealth, який зачепив близько 192,7 млн осіб, стали найбільшими в історії галузі та чітко демонструють, які ризики породжує неврахування вимог безпеки на ранніх стадіях проєктування систем. У поєднанні з вимогами ISO/IEC 27000 це формує комплексний набір ВБ, які мають бути явно відображені в документації та архітектурних рішеннях, а не «дописані» постфактум.

Таким чином, міжнародні стандарти та регуляції фактично задають рамки для формування ВБ, перетворюючи їх на не просто «бажані» характеристики, а на обов'язкові умови допуску системи до експлуатації на певних ринках або в певних доменах. З одного боку, суворі штрафи за GDPR, що вже сягнули кількох мільярдів євро, а з іншого – хронічно низький рівень постійної відповідності PCI

DSS і сотні великих витоків у медичній сфері демонструють прямий економічний ефект від нехтування вимогами безпеки. Вони стимулюють упровадження системного підходу до безпеки, де ВБ розглядаються як невід'ємна частина загальної моделі якості програмного забезпечення. Інтеграція вимог ISO 27000, GDPR, PCI DSS, галузевих норм на кшталт HIPAA та рекомендацій ENISA у процес інженерії вимог уже на початку SDLC дає змогу суттєво знизити ризики витоків даних, кібератак і невідповідності нормативним вимогам, а також оптимізувати сукупні витрати на розробку, супровід і аудит безпеки програмних систем.

Висновки. Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що ігнорування або відкладення вимог безпеки на пізні стадії життєвого циклу розробки ПЗ призводить до значного зростання ризиків, витрат і обсягу переробок. Статистика інцидентів безпеки та економічних втрат наочно демонструє наслідки неповного або некоректного врахування ВБ. Отже, вимоги безпеки мають розглядатися не як другорядні нефункціональні аспекти, а як рівноправна та невід'ємна частина процесу розробки вимог поряд із функціональними. Раннє, систематичне й, за можливості, автоматизоване формування ВБ на основі знань у галузі кібербезпеки є необхідною умовою створення надійних, стійких до загроз програмних систем і зниження загальної вартості їх розробки та супроводу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Xiaoli Lian, Shuaisong Wang, Hanyu Zou, Fang Liu, Jiajun Wu, Li Zhang Incorporating Verification Standards for Security Requirements Generation from Functional Specifications, / PACMSE Volume 2, 2024 – 23 с.
2. Aftab Alam Janisar, Khairul Shafee Kalid, Aliza Sarlan Comprehensive Analysis of Security Requirements Engineering Approaches with Assurance Perspective, 2025 – 17 с.
3. The ISO Survey
4. ENISA ENISA Threat Landscape, 2024
5. European Commission Second Report on the application of the General Data Protection Regulation, 2024 – 32 с.
6. Rachel de Souza DLA Piper GDPR Fines and Data Breach Surve, 2025
7. Steve Alder 2024 Healthcare Data Breach Report, 2024

УДК 004.77

І.М. Удовик[1], В.В. Гнатушенко[1], І.С. Лактіонов[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ FULL-DUPLEX DUAL-BAND СИСТЕМ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ПОЛЬОВИХ РЕПІТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація. В умовах зростаючого дефіциту радіочастотного спектру і підвищення вимог до пропускної спроможності бездротових мереж, пошук ефективних технологічних рішень для польових і тактичних систем зв'язку стає першочерговим завданням. Ця робота присвячена комплексному аналізу впровадження повнодуплексних (full-duplex, FD) дводіапазонних систем в інфраструктуру польових репітерних мереж. Основна мета дослідження – оцінити енергетичну ефективність, продуктивність та економічну доцільність таких систем. Методологія аналізу базується на вивченні сучасних архітектур приймачів, включаючи трансівери з прямим перетворенням (DC-TRX), на безперервних хвилях (CW-TRX) та інноваційні багатопортові архітектури. Оцінка продуктивності ґрунтується на аналізі даних реальних компонентів та стандартів цифрового радіозв'язку, таких як DMR та dPMR, з акцентом на модуляцію 4FSK. Ключові результати роботи включають кількісну оцінку енергоспоживання на основі специфікацій радіопроцесорів CMX7031/7041, що демонструє можливість створення пристроїв із низьким споживанням. Аналіз продуктивності виявив суттєві затримки (до 2,4 секунди RTT) у системах на базі протоколу DMR, що обмежує їх застосування завданнями, некритичними на час відгуку, такими як передача телеметрії та голосовий зв'язок. Крім того, проведено оцінку економічної вигоди, зумовлену дворазовим підвищенням спектральної ефективності, у порівнянні з витратами на апаратну реалізацію систем придушення самоінтерференції. Зазначено високу перспективність повнодуплексних технологій для наступного покоління польових мереж зв'язку, однак їх практичне впровадження вимагає вирішення завдань щодо зниження затримок та подальшої оптимізації методів компенсації самоінтерференції.

Ключові слова: *повний дуплекс (full-duplex), репітер енергетична ефективність, спектральна ефективність, придушення самоінтерференції (SI cancellation), 4FSK, DMR.*

Вступ. Сучасні телекомунікаційні системи зіштовхуються з експоненційним зростанням обсягів даних, що породжує гостру потребу у збільшенні пропускної спроможності бездротових мереж. Ця проблема особливо актуальна у контексті розгортання польових та тактичних мереж зв'язку на базі репітерів, де надійність та ефективність використання обмеженого радіочастотного спектру є критично важливими. Традиційні підходи, засновані на тимчасовому (Time Division Duplex, TDD) та частотному (Frequency Division Duplex, FDD) розділення каналів, накладають фундаментальні обмеження на спектральну ефективність. У цьому контексті технологія повного дуплексу (Full-Duplex, FD) є революційним кроком вперед. FD-системи дозволяють одночасно здійснювати передачу та прийом інформації в тому самому частотному каналі, що теоретично подвоює спектральну ефективність. Такий підхід відкриває нові можливості для проєктування більш продуктивних та економічних мереж зв'язку. Однак реалізація повнодуплексних систем пов'язана з ключовою технічною проблемою – самоінтерференцією (Self-Interference, SI), що вимагає придушення на 100 дБ і більше. Потужний сигнал свого передавача пристрою "заглушує" слабкий корисний сигнал, що надходить на вхід приймача. Ефективне придушення самоінтерференції є ключовою умовою для

працездатності будь-якої FD-системи та потребує комплексного підходу, що поєднує методи аналогової та цифрової обробки сигналів.

Мета цієї статті – провести всебічний аналіз продуктивності, енергоспоживання та економічної доцільності застосування повнодуплексних систем, побудованих на базі модуляції 4FSK, в інфраструктурі польових репітерів. Для цього вирішуються завдання щодо оцінки ключових параметрів ефективності, аналізу сучасних архітектур трансіверів та методів придушення SI.

Постановка задачі. Основне наукове завдання даної роботи полягає в оцінці практичної життєздатності та доцільності впровадження повнодуплексних дводіапазонних репітерних систем. Ця оцінка проводиться шляхом комплексного аналізу наступних ключових параметрів: енергетична ефективність, продуктивність, економічна доцільність. Межі дослідження сфокусовані на системах, призначених для польових репітерних мереж. В якості технологічної основи розглядаються стандарти цифрового радіозв'язку DMR (Digital Mobile Radio) та dPMR, що використовують модуляцію типу 4FSK. Такий вибір обумовлений їх широким поширенням у професійних системах зв'язку, де надійність та дальність дії мають пріоритет над піковою швидкістю передачі даних. Для вирішення поставленої задачі проводиться послідовний технічний аналіз, починаючи з фундаментальних методів придушення самоінтерференції, які лежать в основі будь-якої працездатної системи FD.

Основний зміст роботи. Фундаментальною проблемою проєктування працездатних повнодуплексних систем є SI. Розуміння фізичних принципів її виникнення та методів компенсації є обов'язковою умовою для створення ефективних FD-пристроїв.

Самоінтерференція виникає через те, що сигнал, який випромінюється передавальною антеною (TX) пристрою, потрапляє на його ж приймальну антену (RX). Оскільки передавач і приймач знаходяться в безпосередній близькості, потужність цього сигналу, що заважає, може на 100 дБ і більше перевищувати потужність корисного сигналу, що приймається від віддаленого кореспондента [2]. Без ефективного придушення SI-сигнал повністю насичує аналоговий тракт приймача, унеможливлюючи виділення корисної інформації. Сучасні підходи до вирішення цієї проблеми припускають багатоступінчасту компенсацію перешкоди у трьох основних доменах.

1. Розв'язка в антенному порту (Antenna Port Isolation). Це перший і найбільш інтуїтивно зрозумілий рівень придушення, заснований на фізичній ізоляції передавальної та приймальної антен. До основних методів належать:

- фізичне рознесення;
- екранування;
- перехресна поляризація;
- використання циркуляторів.

2. Аналогове придушення (Analog Cancellation). Цей етап здійснюється в радіочастотному або проміжно-частотному тракті до аналого-цифрового

перетворювача (**АЦП**). Його мета – відняти з прийнятого сигналу копію сигналу самоінтерференції. Найбільш поширеним рішенням є електрично балансні дуплексери (electrically balanced duplexers, EBD). Принцип їх роботи полягає у створенні точної копії SI-сигналу, інвертуванні її по фазі та подальшому додаванні з сигналом, що прийшов на вхід приймача. Це дозволяє компенсувати значну частину перешкоди. Сучасні реалізації EBD здатні забезпечити пригнічення до 53 дБ у смузі пропускання 80 МГц [2].

3. Цифрове придушення (Digital Cancellation). Навіть після проходження перших двох етапів у сигналі залишається залишкова самоінтерференція, потужність якої все ще може бути вищою за рівень корисного сигналу і шумів. Її придушення відбувається у цифровій формі після АЦП. Для цього будується точна цифрова модель каналу самоінтерференції, що враховує не тільки прямий шлях, а й нелінійні спотворення, що вносяться підсилювачем потужності (PA), а також IQ-дисбаланс квадратурних і демодуляторів. За допомогою цієї моделі генерується цифрова копія залишкової SI і віднімається від оцифрованого сигналу. Цифрові методи показують високу ефективність, досягаючи пригнічення до 76 дБ у вузькій смузі 12,5 кГц [2].

Вибір конкретної архітектури приймача безпосередньо впливає на складність реалізації та ефективність кожного з цих методів придушення, а також є визначальним фактором, що впливає на його ключові характеристики: енергоспоживання, складність апаратної реалізації, вартість, створення польових репітерів. У якості основних архітектур використовують:

– трансівер із прямим перетворенням (Direct-Conversion Transceiver, DC-TRX). Це традиційна та найбільш вивчена архітектура для FD-систем [2]. У ній сигнал безпосередньо переноситься з несучої частоти на нульову (baseband) і назад. Основна складність при використанні DC-TRX у повнодуплексному режимі полягає в необхідності реалізації складних та дорогих аналогових компенсаторів для придушення самоінтерференції (SI) ще до АЦП;

– трансівер на безперервних хвилях (Continuous-Wave Transceiver, CW-TRX). Дана архітектура, запозичена із систем FMCW-радіолокації, представляє особливий інтерес для польових репітерів [2]. Її ключова перевага полягає в оригінальному підході до придушення SI. У CW-TRX для гетеродинування (змішування) у приймачі використовується той самий частотно-модульований сигнал, який подається на передавач. В результаті цього перетворення сигнал самоінтерференції (пряме просочування та близькі відбиття) концентрується у вигляді потужної компоненти поблизу нульової частоти. Це дозволяє ефективно придушити його за допомогою простого аналогового фільтра високих частот (High-Pass Filter, HPF);

– одноядерна багатопортова архітектура (Single-Core Multiport Architecture). Це інноваційне рішення, запропоноване для створення компактних та енергоефективних FD-систем [5]. Архітектура заснована на використанні єдиного багатопортового ядра, яке одночасно виконує функції передачі та

прийому для двох частотних діапазонів. Головними перевагами цієї архітектури є верхнє енергоспоживання та компактність.

Таким чином для створення енергоефективного та економічно доцільного польового репітера найбільш перспективними є архітектури CW-TRX та одноядерна багатопортова.

Вибір модуляції 4FSK (Four-level Frequency Shift Keying) для даного аналізу не випадковий. Цей тип модуляції широко застосовується у професійних та комерційних системах радіозв'язку, таких як DMR та dPMR завдяки своїй надійності, стійкості до спотворень у каналі та відносній простоті апаратної реалізації. Ці якості роблять 4FSK особливо релевантним для побудови польових репітерних мереж, де пріоритетом є стабільність зв'язку, а не максимальна пропускна спроможність.

У модуляції 4FSK передачі інформації використовуються чотири різних частотних стани. Кожен стан (символ) кодує два біти інформації (дибіт). Відповідно до стандарту ETSI TS 102 361-1 [9], максимальна девіація частоти (D) для символу розраховується за такою формулою:

$$D = (2/3)*h/T \qquad (1)$$

де h – індекс девіації (для стандарту DMR h = 0,27);

T – тривалість одного символу (для DMR T = 1/4800 секунди).

Відповідність між інформаційними дибітами та конкретними значеннями девіації частоти стандарту DMR представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Відповідність між інформаційними дибітами та конкретними значеннями девіації частоти стандарту DMR

Інформаційні біти (Bit 1, Bit 0)	Символ	Девіація частоти (DMR)
0 1	+3	+1,944 кГц
0 0	+1	+0,648 кГц
1 0	-1	-0,648 кГц
1 1	-3	-1,944 кГц

Пропускна здатність систем на базі 4FSK у рамках стандарту DMR визначається символьною швидкістю 4800 символів за секунду. Оскільки кожен символ несе 2 біти інформації, загальна (або "брудна") швидкість передачі становить 9600 біт/с. Однак корисна пропускна здатність (net rate) значно нижче (близько 1300–1500 біт/с) [8]. Таке істотне зниження обумовлено значними витратами протокольного стека, що включають службову інформацію для кадрування, синхронізаційні поля (68 біт на кожен блок в 264 біта) й надмірність, що вноситься завадостійким кодуванням (FEC) на основі блочно-вироблених турбокодів.

Комплексна оцінка продуктивності системи неспроможна обмежуватися лише аналізом пропускної спроможності. Для польових репітерних мереж не менш важливими параметрами є затримки передачі, якість зв'язку та максимальна дальність дії. Ці характеристики безпосередньо визначають практичну застосовність технології на вирішення конкретних завдань.

Такі високі затримки роблять подібні системи непридатними для додатків, критичних на час відгуку. Проте вони залишаються цілком адекватними для передачі телеметрії, коротких текстових повідомлень і, що найважливіше, для організації голосового зв'язку, де затримки такого порядку є допустимими.

Однією із ключових переваг цифрових систем, таких як dPMR є стабільно висока якість звуку на значно більшій відстані в порівнянні з аналоговими FM-системами [6]. У той час як в аналогових системах якість промови плавно деградує зі збільшенням відстані, у цифрових системах вона залишається практично незмінною аж до межі зони впевненого прийому.

Для стиснення промови в стандарті DMR де-факто використовується вокодер AMBE+2 , який забезпечує адекватну якість і розбірливість при низькій швидкості потоку даних, що становить близько 3600 біт/с [8]. Це дозволяє ефективно використовувати обмежену пропускну здатність каналу голосового зв'язку. Дальність дії в TDMA-системах, таких як DMR визначається не тільки потужністю передавача і чутливістю приймача. Найважливішим фактором, що обмежує, є допустима затримка поширення сигналу. Відповідно до стандарту ETSI TS 102 361-1, максимальна затримка поширення має перевищувати 1 мс , що відповідає теоретичній дальності до 150 км [9]. Перевищення цього порога призводить до порушення синхронізації часових слотів та неможливості коректної роботи мережі.

Додатковими факторами, що впливають на продуктивність, є:

– **дрейф тактових генераторів.** Стандарт допускає відносну нестабільність частоти до ±2 ppm [9]. Цей дрейф є кумулятивним і може значно скоротити максимальну дальність дії при тривалих передачах без пересинхронізації. Наприклад, при розбіжності генераторів 4 ppm (±2 ppm на кожному пристрої) допустимий час передачі для збереження синхронізації на максимальній дальності скорочується, створюючи компроміс між дальністю і тривалістю безперервної сесії зв'язку;

– **ефект Доплера.** У мобільних сценаріях доплерівське зрушення частоти може призводити до збільшення бітових помилок, що вимагає спеціальних заходів компенсації в приймачі [1].

Для польових репітерів, що працюють від автономних джерел живлення (акумуляторів, сонячних панелей), енергетична ефективність є одним із найкритичніших параметрів. Тривалість автономної роботи залежить від енергоспоживання електронних компонентів у різних режимах. Для кількісної оцінки цього параметра було проведено аналіз специфікації сучасного радіопроцесора CMX7031/CMX7041 призначений для систем з модуляцією 4FSK [3].

У таблиці 2 представлені дані про струми споживання цифрової (DIDD) і аналогової (AIDD) шин живлення для ключових режимів роботи пристрою.

Таблиця 2

Струми споживання цифрової (DIDD) і аналогової (AIDD) шин живлення для ключових режимів роботи пристрою

Режим роботи	Швидкість (bps)	Цифровий струм (DIDD, мА)	Аналоговий струм (AIDD, мА)
Powersaved	–	0.008	0.004
IDLE	–	1.4	1.6
Rx Mode (пошук Frame Sync)	4800	4.7	1.6
Rx Mode (пошук Frame Sync)	9600	7.5	1.6
Rx Mode (Frame Sync знайдено)	4800	2.8	1.6
Rx Mode (Frame Sync знайдено)	9600	3.7	1.6
Tx Mode (2- point модуляція)	4800	4.3	1.5
Tx Mode (2- point модуляція)	9600	5.2	1.5
Tx Mode (I&Q модуляція)	4800	5.4	1.5
Tx Mode (I&Q модуляція)	9600	7.3	1.5

Аналіз специфікацій сучасних компонентів показує, що створення повнодуплексних репітерів із низьким енергоспоживанням є цілком досяжним технічним завданням. Ключовим фактором для досягнення максимальної автономності є не тільки вибір енергоефективних компонентів, а й грамотне керування режимами їх роботи, що забезпечує перехід у стан глибокого сну (Powersaved) у будь-який можливий момент.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному міждисциплінарному аналізі, який поєднує теоретичні основи повнодуплексного зв'язку, дані про продуктивність реальних електронних компонентів та практичні аспекти застосування FD-технологій у контексті існуючих стандартів цифрового радіозв'язку. На відміну від вузькоспеціалізованих досліджень, ця робота пропонує системний погляд на проблему, оцінюючи технологію з погляду трьох ключових критеріїв: енергетичної ефективності, продуктивності та економічної доцільності.

Висновки. У ході проведеного дослідження виконано всебічний аналіз перспектив застосування повнодуплексних дводіапазонних систем у польових репітерних мережах. На основі вивчення сучасних архітектур, стандартів цифрового зв'язку та характеристик реальних компонентів було отримано такі ключові висновки.

1. За продуктивністю: повнодуплексні системи на базі модуляції 4FSK теоретично подвоюють спектральну ефективність порівняно з напівдуплексними аналогами. Однак практичні реалізації, що базуються на існуючих протоколах,

таких як DMR, демонструють значні затримки (RTT до 2,4 с). Це обмежує сферу їх застосування завданнями, некритичними на час відгуку, такими як передача телеметрії, коротких повідомлень та організація голосового зв'язку, але робить їх малопридатними для інтерактивних додатків реального часу.

2. За енергетичною ефективністю: аналіз специфікацій сучасних радіопроцесорів (CMX7031/7041) показав, що створення FD-репітерів із низьким енергоспоживанням є технічно досяжним завданням. Споживання в активних режимах становить одиниці міліампер, а використання режимів глибокого енергозбереження (Powersaved) дозволяє знизити його до десятків мікроампер. Вибір оптимальної архітектури трансівера, такий як CW-TRX або одноядерна багатопортова, у поєднанні з грамотним керуванням живлення, дозволяє забезпечити тривалу автономну роботу польових пристроїв.

3. За економічною доцільністю: основна економічна вигода від впровадження FD-технології полягає у дворазовій економії дефіцитного частотного ресурсу. Ця вигода, у поєднанні з потенційним зниженням вартості апаратної частини за рахунок застосування більш простих архітектур придушення SI (наприклад, CW-TRX), здатна переважити витрати на розробку та вирішення проблеми самоінтерференції. Сумісність із існуючими частотними планами (на прикладі DMR) додатково знижує бар'єри застосування.

Таким чином, повнодуплексні дводіапазонні системи є перспективною та стратегічно важливою технологією для наступного покоління польових репітерних мереж. Їх широке практичне застосування стане можливим за умови вирішення завдань щодо зниження затримок на протокольному рівні та розробки адаптивних цифрових алгоритмів для подальшої оптимізації SI-компенсації в нелінійних режимах роботи підсилювачів потужності.

Доповідь підготовлено в рамках проєкту 2025.06/0047 «Інформаційні технології криптографічного захисту й автентифікації даних для систем мобільного та супутникового зв'язку». Проєкт фінансується Національним фондом досліджень України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Murray T. Four frequency-shift keying (4-FSK) spread spectrum modulator and demodulator. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 1993.
2. Marin J. Full-duplex capable multifunction joint radar – communication – security transceiver with pseudonoise – OFDM mixture waveform. PhD Thesis, Tampere University, 2024.
3. CML Microsystems Plc. 4FSK Radio Processor CMX7031/CMX7041 , FI-2.x Datasheet. 2011.
4. Kaya A. High port isolation dual frequency ортогонально polarized inset rectangular patch antenna // Microwave and Optical Technology Letters. 2007. Vol. 49. P. 2843–2848.
5. Tu M., et al. In-band full-duplex dual-band transceiver based on single-core multiport. Research Square preprint, 2024.
6. dPMR ™ Association. dPMR ™ 4 Level FSK/FDMA 6.25 kHz Technology. Whitepaper, V1.4.
7. Aselsan. VHF/UHF Repeater Radio D4741/D4745, R4741/R4745. Technical Specifications Datasheet.
8. Sensor Networks Combined With Digital Mobile Radio // SENSORCOMM 2022: The Sixteenth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2022.

9. ETSI TS 102 361-1 V2.2.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: Air Interface (AI) protocol, 2013.
10. ETSI TS 102490 V1.6.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio, 2010.
11. Saikanmäki J., et al. Experimental performance of a full-duplex transceiver for joint jamming and spectral monitoring // 2019 16th European Radar Conference (EuRAD), 2019.
12. Marin J., Bernhardt M., Riihonen T. Full-duplex multifunction transceiver with joint constant envelope transmission and wideband reception // 2020 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), 2020.
13. Marin J., Bernhardt M., Riihonen T. Full-Duplex Constant-Envelope Jamceiver and Self-Interference Suppression by Highpass Filter: Experimental Validation for Wi-Fi Security // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023. Vol. 41, No. 9.
14. Saikanmäki J., et al. Jamming performance evaluation of a cheap radio controller // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), 2019.
15. Marin J., et al. An Experimental FSK-FMCW Based Joint Radar-Communication System Using a Full-Duplex Radio // 2020 17th European Radar Conference (EuRAD), 2020.
16. Marin J., et al. Sensing Performance of Wideband Full-Duplex Joint Radar – Communications FM – FSK Transceiver // 31st European Signal Processing Conference (Eusipco), 2023.
17. Saikanmäki J., et al. Simultaneous jamming and RC system detection by using full-duplex radio technology // 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), 2019.

УДК 004.75

Д.В. Іванов[1], І.П. Гуліч[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПОСТКВАНТОВА КРИПТОГРАФІЯ У БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМАХ: ВИКЛИКИ БЕЗПЕКИ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Анотація. У роботі розглянуто сучасний стан криптографічного захисту блокчейн-систем та вплив розвитку квантових обчислень на безпеку децентралізованих мереж. Проаналізовано основні алгоритми симетричного та асиметричного шифрування, цифрових підписів і хеш-функцій, визначено їхні обмеження в умовах постквантової епохи. Узагальнено напрями розвитку постквантової криптографії, що включають решіткові, кодові, багатовимірні та хеш-орієнтовані методи. Обґрунтовано доцільність переходу до гібридних

моделей криптографічного захисту, які поєднують класичні та постквантові алгоритми. Результати роботи спрямовані на підвищення рівня стійкості блокчейн-мереж до квантових атак і формування рекомендацій для побудови безпечної інфраструктури Web3.

***Ключові слова**: блокчейн, криптографічні методи, постквантова криптографія, квантові обчислення, алгоритм Шора, алгоритм Ґровера, цифрові підписи, Web3, гібридні криптосистем.*

Вступ. Сучасні блокчейн-технології є базовою складовою інфраструктури цифрової економіки, електронного врядування та фінансових систем. Їхня надійність базується на криптографічних механізмах, які гарантують автентичність і цілісність даних у децентралізованому середовищі. Основу таких механізмів становлять алгоритми симетричного (AES, ChaCha20) та асиметричного шифрування (RSA, ECDSA), а також хеш-функції SHA-256 і SHA-3.

Втім, із розвитком квантових обчислень традиційні криптосистеми втрачають актуальність. Алгоритм Шора ефективно розв’язує задачі факторизації та дискретного логарифмування, що становить основу безпеки RSA та ECC. Алгоритм Ґровера зменшує складність пошуку для симетричних шифрів і хешів у квадратному відношенні. Відповідно, сучасні блокчейн-системи потребують переосмислення принципів криптографічного захисту, зокрема через впровадження постквантових алгоритмів.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження стійкості сучасних криптографічних алгоритмів блокчейну в умовах квантових обчислень та обґрунтування ефективних напрямів впровадження постквантових методів..

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі криптографічні примітиви блокчейн-систем і визначити їхні вразливості до квантових атак;
- дослідити перспективні напрямки постквантової криптографії;
- оцінити можливості інтеграції постквантових алгоритмів у реальні блокчейн-платформи;
- сформулювати принципи побудови гібридних криптографічних моделей для децентралізованих систем.

Основний зміст роботи. У сучасних блокчейн-системах безпека транзакцій, автентифікація користувачів та перевірка цілісності даних базуються на криптографічних методах. Традиційні алгоритми – такі як RSA, ECDSA, AES та SHA-256 – відіграють фундаментальну роль у забезпеченні довіри між вузлами мережі. Проте розвиток квантових обчислень ставить під сумнів надійність цих методів. Квантові алгоритми, зокрема алгоритм Шора та алгоритм Ґровера, здатні радикально зменшити складність обчислень, що підриває основи сучасних криптографічних протоколів.

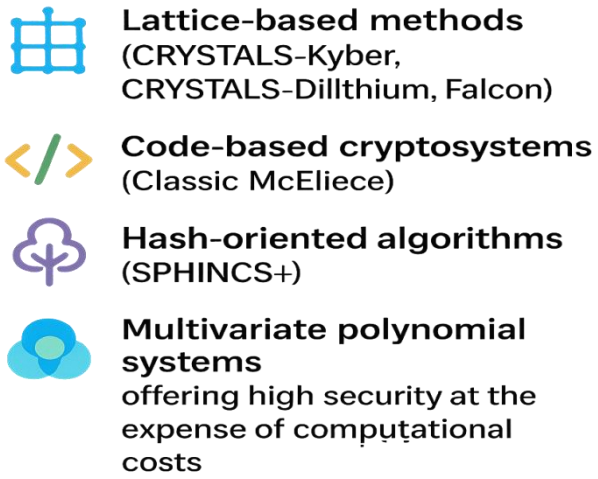


Рис. 1. Алгоритми постквантової криптографі

Постквантова криптографія пропонує альтернативні алгоритми, стійкі до квантових атак. Серед найперспективніших напрямів виокремлюються (рис.1):

- решіткові методи (Lattice-based) – алгоритми CRYSTALS-Kyber, CRYSTALS-Dilithium, Falcon. Засновані на складності задач пошуку коротких векторів у решітках (SVP, CVP). Вони демонструють високу стійкість до квантових атак і прийнятну продуктивність, що робить їх придатними для інтеграції у Web3 та IoT-системи;
- кодові криптосистеми (Code-based) – представником є Classic McEliece. Безпека ґрунтується на складності декодування випадкових лінійних кодів. Відзначаються високою стійкістю, проте характеризуються великим розміром відкритих ключів;
- хеш-орієнтовані алгоритми (Hash-based) – SPHINCS+ та XMSS. Використовують криптографічні дерева Меркла й забезпечують максимальну надійність, але мають низьку швидкість генерації підписів;
- багатовимірні поліноміальні системи (Multivariate polynomial systems) – засновані на складності розв’язання систем нелінійних багатовимірних рівнянь. Забезпечують високий рівень захисту, однак мають значні обчислювальні витрати.

Важливим підходом до переходу від класичних алгоритмів до постквантових є гібридні моделі криптографії. Вони поєднують переваги традиційних методів із постквантовими алгоритмами, забезпечуючи поступову міграцію без втрати сумісності. Наприклад, поєднання підписів ECDSA + Dilithium дозволяє гарантувати безпеку як у класичній, так і у квантовій моделі.

Додатковим аспектом аналізу є практичне питання інтеграції постквантових алгоритмів у діючі блокчейн-архітектури. У більшості популярних платформ – Bitcoin, Ethereum, Hyperledger Fabric, Solana – механізми криптографічного захисту глибоко вбудовані у протоколи консенсусу, формати транзакцій і смартконтракти. Тому пряме заміщення класичних алгоритмів на постквантові вимагає комплексного підходу, який передбачає:

- модифікацію структур блоків із урахуванням збільшення розміру підписів і ключів;
- оновлення протоколів автентифікації вузлів мережі;
- зміни у форматах транзакцій для підтримки нових типів криптографічних доказів;
- оптимізацію часу підтвердження блоку (block confirmation time), який може зрости через складність обчислень.

Одним із практичних напрямів упровадження постквантових алгоритмів є використання гібридних схем цифрового підпису у смартконтрактах. Так, у мережах на базі Ethereum можлива інтеграція підписів типу ECDSA + Dilithium, де перевірка класичного підпису забезпечує сумісність із поточним протоколом, а постквантовий компонент – додатковий рівень захисту. Подібний підхід уже тестується у дослідницьких мережах (testnets) з метою забезпечення “forward security” – тобто збереження довіри до транзакцій навіть після появи повноцінних квантових комп’ютерів.

Гібридна архітектура для блокчейну передбачає наявність двох взаємодоповнювальних шарів:

- класичний шар безпеки – реалізує сумісність із наявними протоколами шифрування (RSA, ECDSA, SHA-3);
- постквантовий шар – додає додаткове шифрування або підписування через алгоритми Kyber, Dilithium або SPHINCS+.

Між цими шарами формується механізм координації ключів, що дозволяє вибирати алгоритм залежно від поточного стану мережі, обчислювальних ресурсів або вимог до швидкодії. Наприклад, при ініціації транзакції система генерує пару ключів для ECDSA і Dilithium, після чого комбінований підпис додається у структуру блоку.

Для кількісної та якісної оцінки ефективності постквантових алгоритмів у межах блокчейн-інфраструктур запропоновано систему порівняльних критеріїв:

- обчислювальна складність (Computational Complexity) – характеризує стійкість алгоритму до квантових атак і визначає рівень теоретичної безпеки;
- продуктивність (Performance) – швидкість генерації ключів, створення та перевірки цифрових підписів, а також швидкість шифрування/дешифрування;
- розмірність (Key and Signature Size) – обсяг відкритих/закритих ключів і довжина підписів, що впливають на пропускну здатність блокчейн-мереж;
- стійкість до атак (Attack Resistance) – здатність алгоритму витримувати відомі класичні та квантові атаки (у тому числі side-channel);
- масштабованість (Scalability) – ефективність алгоритму при інтеграції у великі розподілені системи з обмеженими ресурсами;
- енергоспоживання (Energy Efficiency) – важливо для мобільних і IoT-рішень, де обчислювальні ресурси обмежені;

- сумісність (Compatibility) – можливість використання в існуючих протоколах (TLS, SSH, PKI, Ethereum, Hyperledger) без необхідності повної перебудови інфраструктури.

В експериментальних дослідженнях, проведених для моделі гібридного підпису (ECDSA + Dilithium), було встановлено, що час генерації підпису збільшується приблизно у 2,1 рази, а час перевірки – у 1,8 раза порівняно з класичною схемою. Однак при цьому підвищується стійкість до квантових атак щонайменше на два порядки, що вважається прийнятним компромісом для критичних застосувань (державні реєстри, фінансові системи, системи електронного голосування).

Для блокчейнів, орієнтованих на IoT-рішення, особливу увагу приділяють енергетичній ефективності алгоритмів. Дослідження показують, що решіткові алгоритми (Kyber, Dilithium) забезпечують кращий баланс між енергоспоживанням і швидкістю, ніж багатовимірні системи, завдяки оптимізованим операціям над векторами та можливості апаратної реалізації на FPGA і ASIC.

На основі проведеного аналізу можна зазначити, що решіткові методи (Kyber, Dilithium, Falcon) забезпечують оптимальний баланс між безпекою та швидкодією, тоді як кодові криптосистеми (McEliece) мають найвищу стійкість, але обмежене практичне застосування через великі ключі.

Хеш-орієнтовані алгоритми (SPHINCS+) демонструють максимальний рівень довіри в аспекті криптостійкості, але поступаються за швидкістю.

Багатовимірні системи є перспективними для спеціалізованих застосувань, однак поки не мають широкої стандартизації через складність реалізації.

Важливим висновком є необхідність створення гібридних моделей криптографічного захисту, які поєднують класичні (RSA, ECDSA) та постквантові підходи (Kyber, Dilithium, SPHINCS+), що забезпечує зворотну сумісність і поступовий перехід до нової ери безпеки.

Перспективним напрямом є розробка нативних постквантових блокчейнів, у яких з самого початку закладено алгоритми стійкі до квантових атак. Такі системи, як PQChain, Quantum Resistant Ledger (QRL) та Open Quantum Safe (OQS), демонструють можливість функціонування без залежності від класичних криптопримітивів. Їхня архітектура включає:

- постквантові цифрові підписи (SPHINCS+, Falcon);
- квантово-стійкі протоколи консенсусу;
- квантово-безпечні механізми керування ідентифікацією (QID).

Впровадження таких підходів у поєднанні з гібридними моделями дозволяє створити екосистему Web3 нового покоління, де забезпечується не лише захист від сучасних атак, а й криптографічна стійкість “на десятиліття вперед”.

Наукова новизна полягає у систематизації підходів до забезпечення криптографічної стійкості блокчейн-систем у постквантовому середовищі та

узагальненні критеріїв ефективності впровадження гібридних моделей. Запропоновано концептуальну модель поєднання класичних та постквантових алгоритмів, що дозволяє забезпечити сумісність із чинними протоколами й підвищити рівень довгострокової безпеки децентралізованих систем. Удосконалено методологічний підхід до оцінки продуктивності криптографічних алгоритмів за параметрами швидкодії, розміру ключів і масштабованості у Web3-інфраструктурі.

Висновки. Розвиток квантових обчислень створює серйозні загрози для сучасних блокчейн-технологій. Класичні криптографічні методи втрачають свою стійкість, що потребує переходу до нових парадигм безпеки. Результати дослідження доводять доцільність упровадження постквантових та гібридних криптографічних моделей, що базуються на решіткових і хеш-орієнтованих підходах. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку оптимізованих протоколів постквантового цифрового підпису для блокчейн-платформ, підвищення ефективності обчислень і стандартизацію архітектур безпеки для Web3.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ciulei A.-T., Crețu M.-C., Simion E. Preparation for Post-Quantum Era: A Survey about Blockchain Schemes from a Post-Quantum Perspective. Cryptology ePrint Archive, Paper 2022/026, 2022.
2. Yang Z., Alfauri H., Farkiani B. та ін. A Survey and Comparison of Post-quantum and Quantum Blockchains. arXiv preprint, arXiv:2409.01358, 2024. DOI:10.48550/arXiv.2409.01358.
3. de Boer K., van Woerden W. Lattice-based Cryptography: A Survey on the Security of the Lattice-based NIST Finalists. Cryptology ePrint Archive, Paper 2025/304, 2025.
4. Parida N. K., Jatoth C., Reddy V. D. та ін. Post-Quantum Distributed Ledger Technology: A Systematic Survey. Scientific Reports, 13, 20729 (2023). DOI:10.1038/s41598-023-46715-5.
5. Al-Janabi S. Post-Quantum Blockchain: Challenges and Opportunities. arXiv preprint, arXiv:2508.17071, 2025.
6. Gorbenko Yu. I., Ostrianska Ye. V. Evaluation and comparison of lattice-based digital signature of the “Digital Signature Schemes” PQC NIST competition. Radiotekhnika, 2024. DOI:10.30837/rt.2024.3.310854.
7. Kikuchi T. Towards A Post-Quantum Cryptography in Blockchain I: Basic Review on Theoretical Cryptography and Quantum Information Theory. arXiv preprint, arXiv:2407.18966, 2024.
8. Musa A., Otobong U., John M. N. Lattice-Based Cryptographic Scheme for Secure Blockchain Development and Financial Systems. International Journal of Mathematics and its Applications, 12(3), 2024.

УДК 004.056.5

О.В. Кручінін[1], К.О. Середняк[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОЦІНКА РІВНЯ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ПРОТОКОЛІВ IoT СИСТЕМ

Анотація. Проведено комплексний порівняльний аналіз архітектур безпеки ключових протоколів Інтернету речей (IoT): ZigBee, Z-Wave та Matter. Дослідження ідентифікує фундаментальні підходи до забезпечення конфіденційності, цілісності та автентичності у кожній з екосистем.

***Ключові слова**: інтернет речей (IoT), протоколи, ZigBee, Z-Wave, Matter, Нульова довіра, оцінка ризиків, модель DREAD, автентифікація пристроїв.*

Вступ. Розумний дім є основною сферою застосування Інтернету речей (IoT). Завдяки вбудованим сенсорам, програмному забезпеченню та іншим технологіям, ці пристрої, від звичайних лампочок до промислових верстатів, стають «розумними». Однак ця стрімка інтеграція супроводжується пропорційним зростанням загроз безпеці.

Безпека в IoT не є монолітною – вона залежить та реалізується на різних рівнях стеку протоколів. Ранні протоколи, такі як ZigBee та Z-Wave, розробили власні моделі безпеки, орієнтовані на замкнені екосистеми. На противагу їм, новітній стандарт Matter пропонує фундаментально іншу, уніфіковану парадигму безпеки, засновану на принципах Zero Trust (нульової довіри) та інфраструктурі публічних ключів (PKI).

Постановка задачі. У роботі проаналізовано архітектури безпеки та вектори атак протоколів ZigBee, Z-Wave та Matter, порівняно механізми автентифікації та управління ключами з акцентом на підходах PKI та Zero Trust. Застосування моделі DREAD для кількісної оцінки ризиків дозволило обґрунтувати еволюційні переваги новітніх стандартів захисту IoT-систем.

Основний зміст роботи. Під час роботи були використані наступні методи аналізу, моделі та концептуальні фреймворки:

- метод компаративного (порівняльного) аналізу архітектур безпеки протоколів;
- методологія моделювання загроз для ідентифікації системних вразливостей та векторів атак;
- метод кількісної оцінки ризиків DREAD;
- концептуальні моделі «Нульової Довіри» та Інфраструктури публічних ключів;
- системний аналіз криптографічних стандартів та примітивів.

Унікальний ландшафт загроз IoT, зумовлений обмеженістю ресурсів, фізичною доступністю та гетерогенністю пристроїв, створює підвищені ризики для інформаційної та фізичної безпеки, суттєво ускладнюючи забезпечення базової тріади CIA. Еволюція стандартів відображає концептуальну зміну парадигми захисту, маркуючи перехід від застарілої моделі периметральної безпеки до архітектури нульової довіри (Zero Trust) як необхідну відповідь на зростання складності векторів атак.

Протокол ZigBee здобув широку популярність завдяки своїй енергоефективності, низькій вартості та здатності створювати надійні комірчасті

(mesh) мережі. Вся криптографія в ZigBee покладається на алгоритм AES-128 (Advanced Encryption Standard зі 128-бітним ключем), який використовується як для шифрування, так і для перевірки цілісності (через CCM - Counter with CBC-MAC).

Модель безпеки ZigBee є багаторівневою і реалізується на двох основних шарах: мережевому (NWK) та прикладному (APS). Вся система безпеки тримається на двох типах ключів: Мережевий ключ (Network Key, NK) та Ключі зв'язку (Link Keys, LK).

Процес приєднання нового пристрою (commissioning) виглядає наступним чином: пристрій запитує дозвіл на приєднання, Центр довіри перевіряє його (механізм перевірки може відрізнятися, від «дозволити всім» до списків MAC-адрес) і, у разі успіху, надсилає його Мережевий ключ, зазвичай зашифрований заздалегідь встановленим (pre-configured) ключем зв'язку. Таким чином, наявна архітектура містить критичні вразливості, за яких компрометація окремого периферійного вузла створює загрозу для безпеки всього сегмента мережі.

Паралельно з ZigBee, на ринку домашньої автоматизації розвивався інший пропрієтарний (на той час) протокол – Z-Wave. Працюючи в субгігагерцовому діапазоні, Z-Wave зіткнувся з аналогічними викликами безпеки. Його початкова ітерація, відома як Security 0 (S0), полягала в процесі приєднання (commissioning). Коли новий пристрій S0 додавався до мережі, контролер мав передати йому мережевий ключ. Цей ключ, хоч і був 128-бітним AES-ключем, передавався або у відкритому вигляді, або шифрувався статичним, однаковим для всіх пристроїв ключем. Це створювало ідеальні умови для пасивної атаки «людина-по-середині» (MITM).

Усвідомлення цієї критичної вразливості призвело до повної переробки моделі безпеки та появи фреймворку Security 2 (S2). Ключова інновація S2 – це автентифікація «поза основним каналом». Кожен пристрій S2 має унікальний Специфічний ключ пристрою (Device Specific Key, DSK), який зазвичай представлений у вигляді QR-коду на корпусі або 5-значного PIN-коду. Процес приєднання тепер виглядає так:

1. Користувач ініціює приєднання і сканує QR-код (або вводить PIN) пристрою за допомогою контролера (наприклад, мобільного додатку).
2. Замість передачі статичного ключа, контролер і пристрій використовують протокол Еліптичної криптографії Діффі-Геллмана, що дозволяє їм, використовуючи свої пари відкритий/приватний ключ та DSK (як частину процесу автентифікації), згенерувати спільний, унікальний сеансовий ключ, не передаючи його у відкритому вигляді.
3. Навіть якщо зловмисник прослуховує весь ECDH-обмін, він не може обчислити сеансовий ключ, оскільки не знає приватних ключів сторін. Після встановлення цього безпечного каналу, контролер може безпечно передати пристрою вже постійний мережевий ключ.

Окрім вирішення проблеми MITM, S2 ввів ще одне важливе покращення: гранулярні класи ключів. Замість одного «ключа від усіх дверей», як у ZigBee

NK, S2 ділить пристрої на класи з різними ключами: S2 Unauthenticated (для найпростіших пристроїв, де DSK не перевіряється), S2 Authenticated (для більшості пристроїв, що вимагає DSK-автентифікації), S2 Access Control (для критичних пристроїв, що використовує окремий, унікальний ключ).

Незважаючи на цей колосальний стрибок уперед, Z-Wave S2 зберіг одну потенційну слабкість: зворотну сумісність. Для того, щоб пристрої S2 могли працювати у старих мережах S0, протокол зберіг можливість «відкотитися» до старого, незахищеного стандарту. Саме ці залишкові проблеми – залежність від єдиного виробника, відсутність єдиного стандарту атестації пристроїв та ризики, пов'язані зі зворотною сумісністю – стали поштовхом для розробки наступного, справді уніфікованого та безпечного за замовчуванням протоколу.

Поява Matter знаменує собою не просто чергове оновлення, а фундаментальний зсув у парадигмі безпеки Інтернету речей. Він призначений для роботи поверх існуючих IP-мереж, таких як Wi-Fi та Thread. Цей IP-центричний підхід дозволяє Matter відійти від концепції ізольованих «островів» і зосередитися на найскладнішому питанні: як змусити пристрої від різних виробників безпечно взаємодіяти? Відповідь Matter на це питання – архітектура «Нульової Довіри» (Zero Trust). Жоден пристрій не отримує довіри «за замовчуванням», незалежно від того, чи знаходиться він у тій самій локальній Wi-Fi мережі, що й контролер.

Основою цієї моделі є Інфраструктура Публічних Ключів (Public Key Infrastructure, PKI), подібна до тієї, що захищає переважну більшість веб-сайтів в Інтернеті (HTTPS/TLS). Вся архітектура безпеки Matter тримається на трьох стовпах:

1. Автентичність Пристрою (Device Attestation) – кожен пристрій, що претендує на сертифікацію Matter, повинен мати унікальний криптографічний «паспорт», відомий як Сертифікат Атестації Пристрою (Device Attestation Certificate, DAC).
2. Верифікація під час Введення в Експлуатацію (Secure Commissioning) – коли користувач додає новий пристрій Matter (наприклад, скануючи його QR-код), відбувається складний криптографічний «танець».
3. Розподілений Реєстр Відповідності (Distributed Compliance Ledger, DCL). DCL – це, по суті, глобальна база даних на основі технології блокчейн (або, точніше, розподіленого реєстру), яку підтримує CSA.

Таким чином, Matter зміщує фокус з «безпеки мережі» на «безпеку ідентичності», що є єдиним правильним підходом в умовах, коли сама мережа може бути легко скомпрометована.

Якісного опису вразливостей недостатньо для повної оцінки; необхідна методологія для кількісного порівняння ризиків. Для швидкої порівняльної оцінки архітектурних загроз зручно використовувати простішу, але ефективну модель DREAD. Ця модель, розроблена в Microsoft, дозволяє ранжувати загрози на основі п'яти ключових критеріїв.

Ризик (R_{risk}) для кожної ідентифікованої вразливості розраховується як усереднене значення компонентів, що оцінюються за шкалою (наприклад, від 1 до 10):

$$R_{risk} = \frac{(D + R + E + A + D)}{5}, \quad (1)$$

де D (Потенційна шкода) – наскільки серйозними є наслідки успішної атаки? (1 – незначне порушення, 10 – повний контроль, фізична небезпека).

R (Відтворюваність) – наскільки легко стабільно відтворити атаку? (1 – потрібні унікальні умови, 10 – атака спрацьовує завжди).

E (Експлуатованість) – наскільки складно технічно реалізувати атаку? (1 – вимагає експертних знань та специфічного обладнання, 10 – існують готові інструменти/скрипти, доступно новачку).

A (Кількість уражених користувачів) – яка частка інсталяційної бази є вразливою? (1 – унікальна конфігурація, 10 – всі пристрої протоколу).

D (Легкість виявлення) – наскільки легко знайти вразливість? (1 – приховано в складному коді, 10 – публічно відома вразливість, CVE).

Застосуємо цю модель до ключових архітектурних загроз, які ми обговорювали:

1. Загроза: Компрометація Network Key в ZigBee.
   - D: 10. Зловмисник отримує повний контроль над мережею.
   - R: 9. Після отримання ключа атака є тривіально відтворюваною.
   - E: 6. Вилучення ключа з пристрою вимагає апаратних навичок та інструментів.
   - A: 10. Це архітектурна вразливість, що стосується всіх користувачів мережі, де скомпрометовано хоча б один пристрій.
   - D: 10. Це найбільш відома, фундаментальна та задокументована слабкість ZigBee.
   - Підсумковий Ризик: Дуже високий.
2. Загроза: MITM-атака при приєднанні Z-Wave S0.
   - D: 10. Результат – крадіжка мережевого ключа, що еквівалентно ZigBee-сценарію.
   - R: 10. Атака стабільно працює в момент приєднання.
   - E: 9. Вимагає простого радіообладнання та інструментів для перехоплення.
   - A: 7. Стосується лише старих пристроїв S0 або тих, що були примусово підключені в незахищеному режимі.
   - D: 10. Публічно відома вразливість.
   - Підсумковий Ризик: Критичний (для застарілих систем).
3. Загроза: Атака на ідентичність пристрою Matter (підробка DAC).

- D: 10. Якби це було можливо, це б підірвало всю модель довіри Matter.
- R: 1. Відтворення вимагало б злому кореневого CA альянсу CSA або зламу еліптичної криптографії.
- E: 1. Експлуатація неможлива без компрометації фундаментальних криптографічних примітивів або крадіжки закритих ключів у CSA, що є атакою екстраординарної складності.
- A: 10. Якби це сталося, постраждали б усі.
- D: 1. Вразливості в самому алгоритмі (ECC) наразі невідомі.
- Підсумковий Ризик: Дуже низький. Модель DREAD показує, що хоча шкода є високою, ймовірність (R+E+D) є практично нульовою.

Наукова новизна роботи складається в адаптації та застосуванні методології кількісної оцінки ризиків DREAD для проведення комплексного порівняльного аналізу та квантифікації рівня безпеки гетерогенних архітектур протоколів IoT (ZigBee, Z-Wave, Matter).

Висновки. Аналіз підтверджує еволюцію безпеки IoT від вразливої моделі спільного ключа ZigBee та удосконалених механізмів Z-Wave S2 до парадигми «Нульової Довіри» в Matter. Впровадження інфраструктури PKI та сертифікатів атестації (DAC) у Matter забезпечує фундаментальний зсув від захисту периметра до суворої криптографічної верифікації ідентичності кожного вузла, створюючи найбільш надійну архітектуру для сучасних гетерогенних екосистем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Connectivity Standards Alliance (CSA) Matter Specification Version 1.4 / Connectivity Standards Alliance – Davis, California, 2024 – 1968 с.
2. Silicon Labs Z-Wave Security Whitepaper (INS13474) / Silicon Labs – Austin, Texas, 2023 – 16 с.
3. Texas Instruments The «key» to security: Zigbee 3.0's security features (SSZT545A) / Texas Instruments – Dallas, Texas, 2022 – 7 с.
4. Adam Shostack Threat Modeling: Designing for Security / John Wiley & Sons – Hoboken, New Jersey, 2014 – 624 с.
5. Din I. U., et al. A Comparative Study of Thread Against ZigBee, Z-Wave, Bluetooth, and Wi-Fi as a Home-Automation Networking Protocol (Proceedings of WAINA) / IEEE – Crans-Montana, 2016 – 8 с.
6. OWASP Foundation Threat Modeling Cheat Sheet (Web Application Security) / OWASP Foundation – San Francisco, California, 2023 – 12 с.

УДК 004.056:004.94

В.І. Корнієнко[1], І.С. Послєд[1]
[1]Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ КІБЕРФІЗІЧНИХ СИСТЕМ ВІД ВИТОКУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. В роботі обґрунтована трьохрівнева структура елементів інтелектуальної системи захисту КФС від витоку акустичної інформації. Визначено, що обробка акустичної інформації та прийняття рішень із використанням методів штучного інтелекту забезпечує ефективне розпізнавання аномальних станів акустичного середовища на границі контрольованої зони та адаптацію параметрів для генерації контршуму.

Ключові слова: структура, система захисту, кіберфізична система, акустична інформація, інтелектуальна обробка інформації, нейронна мережа.

Вступ. Стрімкий розвиток цифрових систем та інформаційних технологій розширює можливості як несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, так і засобів захисту від цього. Захист акустичної інформації у кіберфізічних системах (КФС) набуває актуальності для державних установ, військових об'єктів, а також на різних рівнях проведення конфіденційних переговорів. Загроза витоку важливої акустичної інформації потребує постійного вдосконалення методів виявлення, класифікації таких загроз та їх нейтралізацію за допомогою шумозаглушення. В роботі обґрунтовується структура та розглядаються функції елементів інтелектуальної системи захисту КФС від витоку акустичної інформації. Методи штучного інтелекту (ШІ), зокрема, технології машинного навчання та глибокого навчання, здатні ефективно аналізувати акустичні сигнали для виявлення потенційних загроз, значно розширюючи можливості обробки акустичних даних на всіх етапах, зокрема, аналізу сигналів та їх зашумлення. Алгоритми ШІ можуть розпізнавати аномальні звукові шаблони, ідентифікувати несанкціоновані пристрої запису та прогнозувати можливі канали витоку інформації. Це дає змогу створювати адаптивні системи захисту та реагувати на зміну акустичного середовища в режимі реального часу.

Постановка задачі. Метою дослідження є підвищення рівня захисту кіберфізичних систем КФС від витоку акустичної інформації шляхом розробки структури системи захисту інформації на основі інтелектуальних методів обробки інформації та прийняття рішень.

Для досягнення поставленою мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- Обґрунтувати трирівневу структуру системи захисту, яка включає фізичний, рівень цифрової обробки сигналів та рівень інтелектуального аналізу даних.
- Розробити методи обробки акустичних сигналів з використанням перетворення Фур’є та вейвлет-перетворення для ефективного аналізу нестаціонарних сигналів.

- Створити алгоритми інтелектуальної обробки інформації на основі нейронних мереж і машинного навчання для розпізнавання аномальних станів акустичного середовища.
- Забезпечити адаптивне керування процесом шумозаглушення (формування контршуму) з урахуванням поточних характеристик акустичного середовища.
- Розробити критерії оцінювання ефективності системи, зокрема використати метрику F1-score для визначення якості класифікації аномалій.

Основний зміст роботи. Структура інтелектуальної системи захисту КФС від витоку акустичної інформації включає три рівні (табл. 1), які забезпечують: збір і аналіз акустичної інформації всередині та на границі контрольованої зони; оцінку стану каналів витоку акустичної інформації; формування контршуму для маскування конфіденційної акустичної інформації на границі контрольованої зони.

Фізичний рівень складається з:

- акустичних сенсорів та мікрофонів – для реєстрації звукових коливань у приміщенні;
- лазерних детекторів – для виявлення лазерного перехоплення на границі контрольованої зони;
- вібраційних сенсорів – для моніторингу поверхонь на предмет віброакустичних атак та витоків;
- генераторів шуму – для активного маскування мовлення (білий шум, адаптивний шум);
- засобів екранування – звукоізоляційних матеріалів, що обмежують поширення звуку за межі приміщення (контрольованої зони);
- блоку безперебійного живлення – для автономної роботи системи;
- фізичної пам’яті – для резервування та зниження ризиків при передачі даних на сервер та їх локальної обробки;
- мікроконтролерів, що включають в себе програми обробки даних.

Таблиця 1

Структура інтелектуальної системи захисту КФС
від витоку акустичної інформації

Рівень	Апаратно-програмна частина	Функції
1. Фізичний	Мікрофони, вібросенсори, лазерні детектори, екрани, мікроконтролери, генератори шума	Збір та попередня обробка сигналів, екранування, генерація шуму, безперебійне живлення
2. Цифрової обробки сигналів	DSP-процесори, Фур’є-перетворення, вейвлет перетворення	Аналіз час-частотних характеристик сигналів, формування спектру контршуму

3. Інтелектуальної обробки інформації та прийняття рішень	Алгоритми адаптивної фільтрації, алгоритми машинного та глибокого навчання, спеціалізоване програмне забезпечення	Розпізнавання аномалій акустичного середовища, адаптація параметрів шумозаглушення

Цифрова обробка сигналів. Попередня обробка сигналів від сенсорів передбачає формування еталонного (корисного) звукового сигналу та оцінку шумового середовища за різними каналами витоку акустичної інформації на границі контрольованої зони. При цьому, формування еталонного звукового сигналу необхідно для врахування його характеристик при формуванні контр шуму. Обробка сигналів здійснюється в часовій, частотній та час-частотній областях. Для переходу в частотну область використовується перетворення Фур'є, а в час-частотну – вейвлет перетворення.

Алгоритми обробки сигналів реалізуються на цифрових сигнальних процесорах DSP, що збільшує швидкодію та зменшує вимоги до ресурсів мікроконтролера. Такий підхід дозволяє аналізувати спектральний склад сигналів та визначати їх аномалії (особливості) в режимі реального часу. Перетворення Фур'є показує, які частоти присутні у сигналі, але не вказує, коли саме ці частоти виникають. Для сигналів із змінними у часі характеристиками це є суттєвим.

Більш гнучким інструментом для час-частотного аналізу є вайвлет-перетворення, який шляхом розділення сигналу на компоненти різного часового масштабу дає можливість отримати більш точну інформацію про еволюції спектру сигналу у часі. Основна область застосування вейвлет-перетворень – аналіз і обробка сигналів і функцій, нестаціонарних в часі або неоднорідних в просторі, коли результати аналізу повинні містити не тільки загальну частотну характеристику сигналу (розподіл енергії сигналу по частотних складових), але і відомості про певні локальні координати, на яких проявляють себе ті або інші групи частотних складових, або на яких відбуваються швидкі зміни частотних складових сигналу (Корнієнко, 2020). Прикладами таких сигналів є, зокрема, мова і музика.

Для виділення (фільтрації) корисного сигналу на тлі шуму використовуються різні методи: Вінера, спектрального віднімання тощо. При цьому, наприклад, фільтр Колмогорова-Вінера забезпечує мінімізацію середньоквадратичної помилки між оригінальним та відновленим сигналами (Горєв, 2024). Для виявлення витоків інформації або сторонніх пристроїв запису використовуються автоенкодери із формуванням моделей нормального стану акустичного середовища, що дозволяє виявляти аномалії у звукових записах.

Формування спектру контр шуму здійснюється шляхом генерації маскувального шуму в частотній або часовій (Active Noise Cancellation, ANC) областях. В спектральній області формується шум зі спектром H~A/X, де X – спектр корисного сигналу на границі контрольованої зони, A – постійний

коефіцієнт перетворення. Тоді сигнал за межами контрольованої зони буде мати спектр Y=HX ~ A, тобто спектр постійної амплітуди A, а це білий шум.

В часовій області формування шуму з ANC здійснюється шляхом генерування звуку в протифазі до корисного сигналу, який підлягає маскуванню. Відбувається придушення корисного сигналу у реальному часі. Для цього використовуються адаптивні алгоритми, зокрема, найменшої середньоквадратичної помилки LMS або найменшої рекурсивної квадратичної помилки RLS (Горєв, 2024).

Інтелектуальна обробка інформації та прийняття рішень. Інтелектуальна обробка сигналів акустичної інформації здійснюється за допомогою адаптивних фільтрів-апроксиматорів (АФА), які мають рекурсивні і нерекурсивні зв'язки, а також виконують перетворення сигналів. У них процес адаптації включає оцінювання шуканого виходу фільтру і корегування його параметрів за значенням вихідної похибки.

Для побудови і реалізації структури динамічної моделі сигналу перспективними є засоби інтелектуальної обробки інформації (нейронні мережі (НМ), системи нечіткого висновку, гібридні системи), оскільки вони легко настроюються (адаптуються) під властивості сигналу, що змінюється, і, відповідно, є ефективними засобами моделювання складних систем (Корнієнко, 2020; Горєв, 2024).

Наприклад, при побудові АФА перспективним вважається використання НМ, зокрема, НМ із функціями активації у вигляді вейвлет (вейвнетів – **Wave**net **Net**work). Такі АФА апроксимують нелінійні функції з високою точністю. Наразі вейвнети широко застосовуються для аналізу та машинного синтезу голосу. Іншим прикладом засобу інтелектуальної обробки інформаціє є нейронний вайвлет АФА, який використовує вейвлет-аналіз та НМ, що дозволяє ефективно апроксимувати і фільтрувати сигнали, особливо в умовах шуму чи невизначеності.

Інтелектуальне прийняття рішень передбачає вирішення задачі класифікації стану акустичного середовища. При цьому використовуються:

– нейронні мережі – для класифікації акустичних загроз витоку;
– методи машинного навчання – для аналізу акустичного середовища та виявлення аномальних станів на границі контрольованої зони;
– адаптивне налаштування захисту – зміна характеристик та параметрів генерації шуму залежно від особливостей та рівня загрози витоку.

Для розпізнавання аномальних станів акустичного середовища та визначення параметрів для генерації контршуму використовуються методи машинного навчання:

- Supervised lerning – навчається на відомих сигналах по базі класифікованих типів витоків або джерел за акустичними патернами (шаблонами, образами);
- Unsupervised learning – кластерізація невідомих сигналів за допомогою автоенкодерів;

- Semi-supervised learning – коли є мало «помічених» витоків, але багато фонових джерел звуку.

Для аналізу акустичних спектрограм використовуються згорткові НМ.

Методи розпізнавання джерел акустичних витоків:

- саунд-локалізація – виявляє напрямок звуку та розташування пристрою за допомогою мікрофонних матриць (рейд-мікрофони);
- аудіо-фінгерпринтинг – ідентифікує джерела, формує звукові шаблони та застосовується для зменшення навантаження на класифікатор (НМ).

Для реалізіції програмної платформи на Python використовується бібліотека Tensor Flow Scikit-learn, яка дозволяє здійснювати:

- реєстрацію сигналу з микрофонів;
- розпізнавання мови (опціонально);
- розділення сигналу на семпли (відрізки аудіо інформації);
- кодування розкладання сигналу;
- класифікацію сигналів та акустичного середовища на границі контрольованої зони: виявлення аномалій та реалізація адаптивного шумоподавлення.

Як критерій оцінки якості виявлення аномалій застосовується метрика F1-score, яка враховується в режимах мінімізації помилкових тривог (Precision) та максимізації ймовірності виявлення аномалій (Recall), і є популярною метрикою при дисбалансі класів та показує яку вірогідність розпізнавання має класифікатор (НМ). Таким чином, процес функціонування запропонованої інтелектуальної системи захисту КФС від витоку акустичної інформації включає наступні процедури:

1. Збір та обробка даних: створення бази даних акустичних сигналів, що містять як безпечні, так і потенційно небезпечні зразки.
2. Навчання моделей: використання зібраних даних для тренування моделей машинного навчання, здатних розпізнавати та класифікувати різні типи станів ризиків витоку акустичної інформації на границі контрольованої зони.
3. Реалізація системи в реальному часі: інтеграція навчених моделей в апаратно-програмний комплекс, що здійснює моніторинг та захист акустичного середовища в режимі реального часу.
4. Постійне оновлення та вдосконалення: систематичне оновлення бази даних та перенавчання моделей для врахування нових загроз витоку та підвищення ефективності захисту.

Наукова новизна роботи полягає у обґрунтуванні структури та визначенні функцій елементів системи захисту на основі інтелектуальних методів обробки інформації та прийняття рішень, що підвищує рівень захисту КФС від витоку акустичної інформації.

Висновки. Обґрунтована трьохрівнева структура системи захисту КФС від витоку акустичної інформації, яка забезпечує: збір і аналіз акустичної інформації всередині та на границі контрольованої зони; оцінку стану каналів витоку акустичної інформації; формування контршуму для маскування конфіденційної

акустичної інформації на границі контрольованої зони. Для цифрової обробки сигналів запропоновано використання перетворення Фур'є та вейвлет перетворення, що забезпечує ефективний аналіз та обробку нестаціонарних у часі та неоднорідних в просторі сигналів. Визначено, що обробка акустичної інформації та прийняття рішень із використанням методів штучного інтелекту забезпечує ефективне розпізнавання аномальних станів акустичного середовища на границі контрольованої зони та адаптацію параметрів для генерації контршуму. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку алгоритмів для реалізації інтелектуальної системи захисту КФС від витоку акустичної інформації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Корнієнко В. І., Гусєв О. Ю., Герасіна О. В. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів у системах керування, кібербезпеки, телекомунікацій : підручник / за заг. ред. В.І. Корнієнка. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 536 с.
2. Івасюк Ю. Штучний інтелект в інформаційній безпеці: методи виявлення загроз : навч. посіб. – Київ : НАУ, 2021. – 168 с.
3. Hansen C. H. Understanding Active Noise Cancellation. – Boca Raton: CRC Press, 2011. – 304 c.
4. Chen X., Choo K.-K. R., Shen Q. Machine Learning for Cybersecurity: Foundations, Advanced Techniques, and Applications. – Cham: Springer, 2022. – 269 c.
5. Корнієнко В., Кручінін О., Плєц О., Герасіна О., Тимофєєв Д. (2021) Кіберфізична система моделювання захисту акустичної інформації від витоку оптико-електронним каналом // *Information Technology: Computer Science, Software Engineering, Cyber Security*, 2021, Вип. 2, С. 19-25. https://doi.org/10.32782/IT/2021-2-3.
6. Wu Ch., Yao W., Sun G., Wu L. Security of Cyber-Physical Systems: State Estimation and Control. – Cham: Springer, 2022. – 264 c.
7. Motahhir S., Maleh Y. Security Engineering for Embedded and Cyber-Physical Systems. – Boca Raton : CRC Press (Taylor&Francis), 2024. – 200 c.
8. Koç Ç. K. Cyber-Physical Systems Security. – Cham: Springer, 2018. – 284 c.
9. Chhetri S. R., Al Faruque M. A. Data-Driven Modeling of Cyber-Physical Systems Using Side-Channel Analysis. – Cham : Springer, 2020. – 90 c.
10. Горєв В. М., Корнієнко В. І., ГусєвО. Ю. Адаптивна фільтрація: теорія та застосування: навч. посіб. / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 146 с.

УДК 004.382.4

А.О. Корченко[1], І.М. Удовик[1], В.І. Олевський[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ СИСТЕМ З 4FSK МОДУЛЯЦІЄЮ ПІД ПРОПРІЄТАРНІ АЛГОРИТМИ ШИФРУВАННЯ

Анотація. У статті представлено дослідження, присвячене аналізу доцільності та оцінки продуктивності при інтеграції успадкованої техніки шифрування фізичного рівня в модель сучасної системи зв'язку. Розглядається комплексна модель фізичного рівня, що базується на стандарті Digital Mobile Radio (DMR), який використовує чотирипозиційну частотну маніпуляцію (4FSK). Ключовою особливістю дослідження є інтеграція пропрієтарного алгоритму шифрування, що реалізується шляхом перемноження основного модульованого сигналу з широкосмуговою псевдовипадковою послідовністю (ПСП), що є формою розширення спектра з прямою послідовністю (DSSS). Метою роботи є всебічний аналіз продуктивності такої гібридної системи. Методологія включає розробку симуляційної моделі для оцінки ключових метрик, таких як ймовірність бітової помилки (BER) та затримка обробки. Аналіз проводиться для двох сценаріїв: легітимного одержувача, що володіє інформацією про параметри ПСП та здатного виконати кореляційну обробку для її придушення, та нелегітимного одержувача, для якого ПСП виступає у ролі структурованої перешкоди.

Ключові слова *4FSK, фізичний рівень, пропрієтарне шифрування, BER, моделювання, DMR, псевдовипадкова послідовність.*

Вступ. Чотирипозиційна частотна маніпуляція (4FSK) є однією із фундаментальних видів цифрової модуляції, що зберігає свою актуальність у широкому спектрі сучасних систем радіозв'язку. Її ключова перевага полягає в постійній огинаючій сигналу, що дозволяє використовувати більш ефективні і менш лінійні підсилювачі потужності, знижуючи енергоспоживання та вартість абонентських пристроїв. Цей вид модуляції знайшов широке застосування у стандартах професійного мобільного радіозв'язку, таких як Digital Mobile Radio (DMR) [3] та dPMR [4]. Стандарт DMR, розроблений Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI), визначає використання 4FSK у поєднанні з технологією множинного доступу з поділом часу (TDMA) у стандартній сітці частот 12,5 кГц. Подальший розвиток технології, зокрема застосування 4FSK у системах із частотним поділом каналів (FDMA) зі смугою 6,25 кГц, демонструє ще більшу спектральну ефективність, дозволяючи розмістити чотири незалежні канали зв'язку в смузі, що раніше займалася одним аналоговим каналом [6].

Зі зростанням числа бездротових пристроїв питання забезпечення конфіденційності виходять на перший план. Традиційні криптографічні методи, що застосовуються на верхніх рівнях моделі OSI, є стандартом де-факто, проте вони не завжди можуть забезпечити повну безпеку, особливо в умовах атак, спрямованих на фізичний рівень (PHY). Перехоплення радіосигналу та навмисні перешкоди (jamming) становлять серйозну загрозу для критично важливих систем зв'язку. У зв'язку з цим зростає інтерес до методів забезпечення безпеки безпосередньо фізично. Концепції, що розвиваються в рамках суміщених систем радіолокації, зв'язку та безпеки (JRCS), пропонують інноваційні підходи до цієї проблеми [2]. Одним із таких підходів є використання шумоподібних сигналів для маскування корисної інформації. Легітимні користувачі, володіючи апріорною інформацією про структуру цього сигналу (наприклад, про псевдовипадкову послідовність), можуть ефективно придушити його, в той час як для стороннього спостерігача він буде відмінним від перешкоди.

Дане дослідження представляє аналіз доцільності та оцінку продуктивності при інтеграції успадкованої техніки шифрування фізичного рівня в модель сучасної системи зв'язку. У роботі адаптується та моделюється схема шифрування, чия практична реалізація була задокументована в дисертації 1993 р. для супутникової системи на низькій навколоземній орбіті [1], для подальшого аналізу в контексті моделі сучасної наземної системи цифрового мобільного радіозв'язку (DMR) на основі стандарту ET1 [1] TS3. Основною метою статті є розробка та всебічний аналіз комплексної моделі фізичного рівня системи з 4FSK модуляцією, оптимізованою для роботи з пропрієтарним алгоритмом шифрування.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

– створення симуляційної моделі системи;

– аналіз впливу шифрування на ключові метрики;

– проведення експериментальної верифікації.

2. Постановка задачі. Для проведення всебічного аналізу ефективності запропонованого методу захисту необхідно формалізувати модель системи зв'язку, визначити ролі її учасників та сформулювати конкретні дослідницькі питання.

Основний зміст роботи. В якості основи розглядається система цифрового мобільного радіозв'язку, фізичний рівень якої відповідає стандарту DMR Tier II [3]. Ключові параметри базової системи: чотирипозиційна частотна маніпуляція (4FSK); полоса каналу: 12,5 кГц; множинний доступ із поділом за часом (TDMA) з двома тимчасовими слотами; тривалість TDMA-кадра становить 60 мс, кожен із двох слотів займає 30 мс; символьна швидкість становить 4800 символів за секунду, що відповідає швидкості 9600 біт/с до застосування канального кодування.

Ця базова модель є стандартною конфігурацією, що широко використовується в сучасних професійних системах радіозв'язку. Запропонований алгоритм шифрування реалізується фізично шляхом модифікації сигналу, що передається. У рамках дослідження розглядається сценарій із трьома основними учасниками: передавач, легітимний одержувач, нелегітимний одержувач.

1. Базовою моделлю фізичного рівня 4FSK для аналізу впливу пропрієтарного шифрування була модель = стандарту DMR, описаного у специфікації ETSI TS 102 361-1 [3].

Модуляція 4FSK передбачає передачу двох інформаційних біт (дибіту) за символальний інтервал шляхом зміни частоти несучої. Стандарт DMR визначає чотири рівні частотних відхилень щодо центральної частоти. Відповідність між дибітами та відхиленнями частоти представлена в таблиці 1.

Таблиця 1

Відповідність дибітів та частотних відхилень для 4FSK

Інформаційні біти	Символ	Відхилення частоти 4FSK

0 1	+3	+1,944 кГц
0 0	+1	+0,648 кГц
1 0	-1	-0,648 кГц
1 1	-3	-1,944 кГц

Відхилення частоти визначені як цілі кратні (±1 і ±3) базового відхилення 0,648 кГц. Це відповідає модуляції 4FSK з індексом девіації h=0,27 та символьною швидкістю 4800 символів/с, як зазначено у розділі 10.2.2.1 стандарту [3]. Перед подачею на модулятор послідовність символів проходить через цифровий фільтр обмеження спектру та мінімізації перешкод на сусідні канали. Стандарт DMR (розділ 10.2.2.2) [3] передбачає використання фільтра з характеристикою "корінь з піднятого косинуса" (Root Raised Cosine, RRC).

Фізичний канал DMR організований з урахуванням TDMA з двома слотами в каналі шириною 12,5 кГц. Повний TDMA-кадр має тривалість 60 мс та складається з двох тимчасових слотів по 30 мс. Для захисту інформації, що передається, від помилок стандарт DMR передбачає використання кодів прямого виправлення помилок (FEC). Зокрема, для захисту блоків даних застосовується блоковий продукт-код, відомий як блоковий турбо-код (BPTC) з параметрами (196,96), як описано в додатку B стандарту [3].

На цю базову модель, що відповідає відкритому стандарту, буде накладено сигнал, що шифрує, принципи формування та обробки якого розглядаються далі.

2. Моделювання пропрієтарного алгоритму шифрування реалізується як різновид техніки розширення спектра із прямою послідовністю (DSSS). Як розширювальна послідовність використовуєтся m-послідовність (послідовність максимальної довжини), що володіє хорошими автокореляційними властивостями. У роботі моделюється m-послідовність завдовжки 127 чіпів, що генерується 7-розрядним зсувним регістром [1]. Початковий стан регістру є секретним ключем.

На передавальній стороні генеруються два сигнали: інформаційний сигнал 4FSK і шифруючий сигнал ПСП (біполярні імпульси ±A). Ці два сигнали об'єднуються шляхом їх перемноження, що в частотній області еквівалентно згортці їх спектрів і призводить до значного розширення підсумкового спектру. В результаті вихідний вузькосмуговий 4FSK-сигнал "розмазується" ширшою смугою, а його спектральна щільність потужності знижується, роблячи сигнал шумоподібним.

Ключовим параметром є відношення потужності сигналу, що шифрує, до потужності корисного сигналу. Адаптуючи концепцію відношення потужності перешкоди до сигналу (Jamming-to-Signal Power Ratio, JSR), поширеного в сучасній літературі за JRCS [2], введемо співвідношення "Шифр/Сигнал" (СШС):

$$Шифр / Сигнал = 10 \times \log 10 \frac{P_{psp}}{P_{4FSK}} \quad (1)$$

де P_{psp} – потужність сигналу ПСП;

P_{4FSK} – потужність сигналу 4FSK.

На боці легітимного приймача виконується зворотна операція – згортання спектру (despreading). Для цього прийнятий комбінований сигнал множиться на локально згенеровану та синхронізовану копію ПСП. В результаті енергія корисного сигналу концентрується у вихідній вузькосмуговій ділянці. Після вузькосмугової фільтрації відношення сигнал/шум значно зростає і очищений сигнал може бути успішно демодульований. Для нелегітимного одержувача, який не знає параметрів ПСП, операція зсідання неможлива.

3. Симуляційне моделювання та аналіз продуктивності необхідний для кількісної оцінки впливу алгоритму шифрування на продуктивність системи та визначення оптимальних робочих параметрів. Була створена комплексна модель, що включає передавач, канал зв'язку та два типи приймачів. Ключові параметри моделі зведені до таблиці 2.

Основним показником якості є залежність BER від SNR. У ході моделювання було отримано криві BER

Базова 4FSK: ця крива служить зразком, показуючи продуктивність стандартної системи DMR.

4FSK + Шифрування (Друг): крива продуктивності для легітимного одержувача демонструє незначну деградацію (менше 0,5 дБ) порівняно з базовою системою, що зумовлено неідеальністю процесу синхронізації. Це підтверджує, що процедура дешифрування ефективно пригнічує маскувальний сигнал.

Таблиця 2

Параметри симуляційної моделі

Параметр	Значення
Тип модуляції	4FSK
Смуга каналу	12,5 кГц
Швидкість передачі (інф.)	1200 біт/с (базова, по [1]); до 1500 біт/с (ефективна пропускна здатність DMR, по [10])
Канальне кодування (FEC)	BPTC(196,96)
Тип ПСП	m-послідовність
Довжина ПСП	127 чіпів
Відношення Шифр/Сигнал (ЗШС)	Варіювання, від -10 дБ до +5 дБ
Модель каналу	Адитивний білий Гаусівський шум (АБГШ)

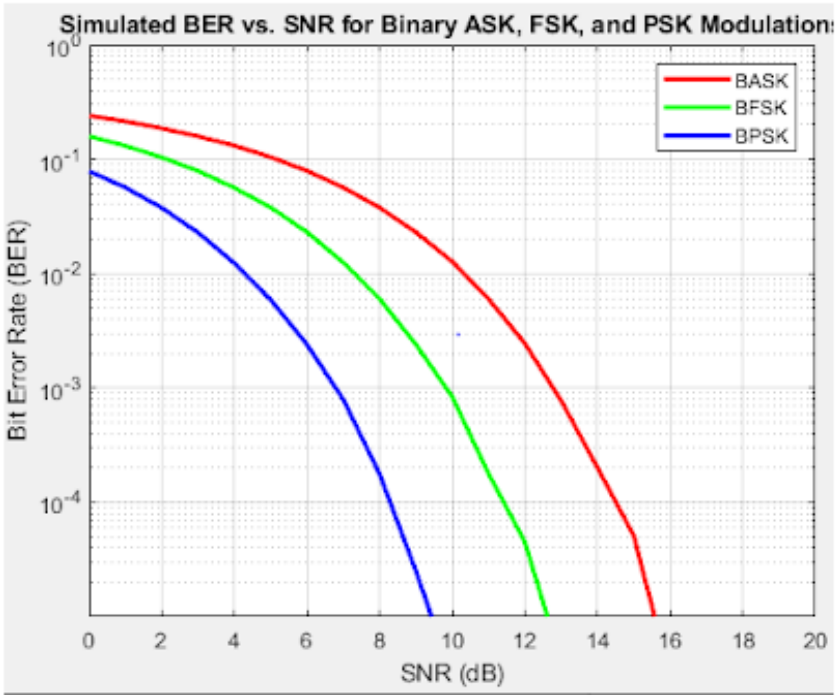


Рис. 1. Криві BER

4FSK + Шифрування (Зловмисник): для нелегітимного одержувача ПСП виступає як структурована широкосмугова перешкода, що підвищує рівень шуму на вході вирішального пристрою демодулятора. Це призводить до різкого усунення кривої BER вправо, що еквівалентно значному енергетичному програшу. При помірних значеннях SNR, де легітимний приймач працює майже без помилок, у "ворога" BER знаходиться на рівні, що робить прийом інформації практично неможливим.

Введення алгоритму шифрування вносить додаткову затримку. Основними джерелами є:

- затримка синхронізації: перед дешифруванням приймач повинен виконати пошук і синхронізацію з ПСП, використовуючи кореляційні методи, наприклад, схему стеження "Early-Minus-Late" [1].
- затримка на цифрову обробку: операція множення ПСП також вносить деяку затримку.

У контексті стандарту DMR, де тривалість TDMA-слоту становить 30 мс [3], додаткова затримка в кілька мілісекунд є прийнятною для більшості програм.

Вплив на канальне кодування.

Для нелегітимного одержувача: шифруюча послідовність значно збільшує кількість помилок бітів до етапу декодування. Коли рівень вхідних помилок перевищує поріг корекції декодера BPTC відбувається так званий "обрив" (cliff effect): продуктивність декодера різко падає, і на виході з'являється практично випадкова послідовність біт.

Для легітимного одержувача: оскільки операція дешифрування виконується *до* FEC-декодера, на його вхід надходить сигнал, рівень помилок у якому визначається лише шумом у каналі. Отже, продуктивність канального кодування для "друга" не страждає.

Результати моделювання підтверджують теоретичну ефективність системи. Для остаточної верифікації потрібно провести експериментальну перевірку.

Архітектура лабораторного стенду заснована на схемах модулятора та демодулятора, представлених у роботі [1]. У той час як оригінальний експеримент 1993 р. використовував конструкцію на дискретних компонентах (наприклад, операційні підсилювачі LM318, дискретні DBM), функції обробки основної смуги в нашій моделі аналогічні тим, що реалізовані в сучасних інтегральних процесорах 4FSK, таких як CMX7031/7041 [5], що демонструє актуальність основоположних принципів, яка зберігається.

Блок-схема стенду:

Передавальна частина: включає генератор ПСП та змішувач (Doubly Balanced Mixer, DBM), який перемножує 4FSK сигнал і сигнал ПСП.

Приймальна частина: складається ыз вхідного смугового фільтра (BPF), корелятора (реалізованого на другому змішувачі та локальному генераторі ПСП), блоку синхронізації ПСП і блоку прийняття рішень.

Необхідно відзначити, що параметри частот, що використовуються в апаратному прототипі, описаному в [1], є проміжними частотами і служать для демонстрації принципу роботи, а не кінцевою частотою РЧ системи DMR (табл. 3).

Таблиця 3

Ключові параметри експериментального стенду [1]

Параметр	Значення
Центральні частоти 4FSK (ПЧ)	76.2, 152.4, 228.6, 304.8 кГц
Тип генератора ПСП	7-розрядний зсувний регістр
Довжина ПСП	127 чіпів
Модуль синхронізації	Схема "Early-Minus-Late"
Модуль стеження за частотою	"Track module" для компенсації доплера

Результати експерименту. Робота системи проілюстрована осцилограмами. На рис.2 та рис.3 показана різниця в обробці сигналу для несинхронізованого ("ворог") та синхронізованого ("друг") приймачів.

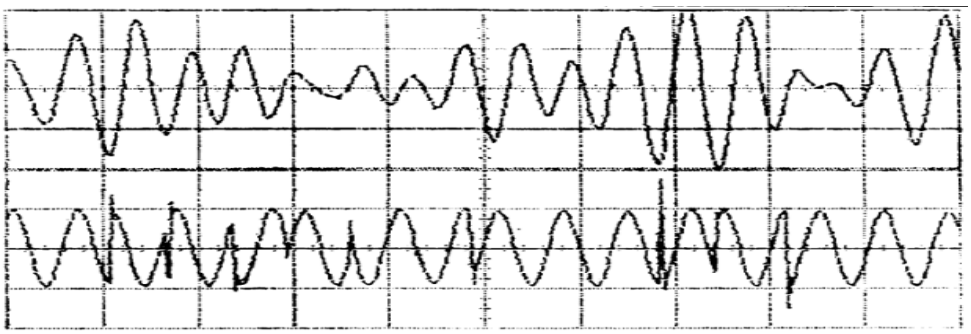


Рис. 2. Обробка сигналу для несинхронізованого приймача [1]

Рис. 2. демонструє, що для несинхронізованого приймача сигнал на виході вузькосмугового фільтра має амплітуду, що псевдовипадково змінюється, а його енергія "розмазана" і не концентрується. Це відповідає сценарію прийому "ворогом".

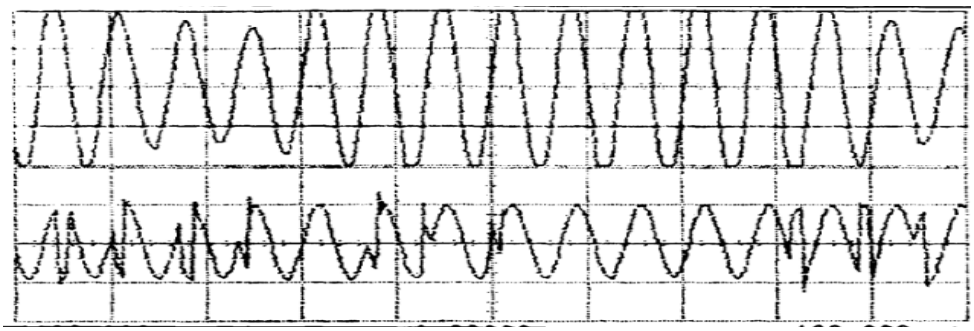


Рис. 3. Обробка сигналу для синхронізованого приймача [1].

Рис. 3 показує, що після кореляційної обробки (множення на локальну ПСП) енергія сигналу концентрується і на виході того ж вузькосмугового фільтра формується стабільний ВЧ-імпульс. Це відповідає сценарію прийому "другом".

Ці осцилограми експериментально доводять, що для легітимного приймача, синхронізованого з ПСП, сигнал успішно відновлюється, тоді як для несинхронізованого приймача залишається шумоподібним.

Ширина спектра розширеного сигналу може бути оцінена за такою формулою:

$$Spread\ Spectrum\ BW = \frac{2}{T_{bit} / N_{chips}} \qquad (2)$$

де T_{bit} – тривалість інформаційного біта,

N_{chips} – довжина ПСП (127).

У мобільних системах, особливо під час роботи ыз супутниками, значний вплив може надавати доплерівський зсув частоти. Цей зсув може порушити

синхронізацію за ПСП. Величина відносної швидкості v_rel(t) може бути розрахована за формулою

$$v_{rel}(\mathrm{t}) = \frac{R \times V_{sat} \sin(\theta)}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2R\cos(\theta)}} \tag{3}$$

де R – радіус Землі,

V_sat – орбітальна швидкість супутника,

θ(t) – кут піднесення, що залежить від часу, і похила дальність.

Для компенсації цього ефекту експериментальна установка [1] включає модуль стеження (Track module). Цей модуль аналізує неузгодженість за частотою і формує напругу керування для підлаштовування частоти локального генератора ПСП, що дозволяє підтримувати надійну синхронізацію в реальних умовах.

Експериментальні дані повністю підтверджують результати симуляційного моделювання та демонструють життєздатність запропонованого підходу.

Наукова новизна цього дослідження полягає у розробці та аналізі комплексної моделі, яка не просто описує окремий метод, а вирішує задачу інтеграції успадкованої, апаратно-перевіреної техніки шифрування в сучасну, стандартизовану модель системи зв'язку.

Висновки. Запропонований метод шифрування фізично шляхом перемноження стандартного 4FSK-сигналу з псевдовипадковою послідовністю продемонстрував високу ефективність.

Додаткові обчислювальні витрати та затримка, що вносяться алгоритмом (включаючи синхронізацію за ПСП та кореляційну обробку), є незначними в контексті тимчасової структури стандарту DMR.

Результати експериментального тестування, проведеного на макеті [1], повністю підтвердили висновки, отримані під час моделювання.

Робота відкриває низку перспективних напрямів. Одним ыз них є розробка адаптивних алгоритмів, які б динамічно змінювати співвідношення шифр/сигнал (ЗШС) залежно стану каналу і необхідного рівня безпеки.

Доповідь підготовлено в рамках проєкту 2025.06/0047 «Інформаційні технології криптографічного захисту й автентифікації даних для систем мобільного та супутникового зв'язку». Проєкт фінансується Національним фондом досліджень України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Murray T. Four frequency-shift keying (4-FSK) spread spectrum modulator and demodulator. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1993.
2. Marin J. Full-duplex capable multifunction joint radar-communication-security transceiver with pseudonoise-OFDM mixture waveform. PhD Thesis, Tampere University, 2024.

3. ETSI TS 102361-1 V2.2.1. Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: Air Interface (AI) protocol. European Telecommunications Standards Institute, 2013.
4. ETSI TS 102490 V1.6.1. Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio. European Telecommunications Standards Institute, 2010.
5. CMX7031/CMX7041 FI-2.x 4FSK Radio Processor. Data Sheet. CML Microsystems Plc, 2011.
6. dPMR™ Association. 4 Level FSK-FDMA 6.25 kHz Technology. Whitepaper V1.4.
7. Bratskas T., et al. Integration of DMR Handheld Radios в Sensor Network використовуючи MQTT Protocol. SENSORCOMM 2022: The Sixteenth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2022.

УДК 004.056

Р.В. Корольов[1], В.Є. Сокол [1]
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

БЕЗПЕЧНІ РЕПІТЕРНІ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ ЦИФРОВИХ РАДІОМЕРЕЖ: КОМБІНОВАНИЙ ПРОТОКОЛ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТА ШИФРУВАННЯ

Анотація. У сучасних цифрових системах професійного радіозв'язку, таких як DMR, використання шифрування є стандартом забезпечення конфіденційності переговорів. Однак стандартні ретранслятори (репітери) у таких мережах функціонують як "прозорі" підсилювачі сигналу: вони ретранслюють повністю зашифрований трафік без можливості його аналізу. Такий підхід, забезпечуючи наскрізну безпеку, суттєво обмежує гнучкість мережевої

архітектури, оскільки репітер не може виконувати інтелектуальні функції, такі як динамічна маршрутизація, фільтрація трафіку або шлюзування між різними групами розмов. Метою роботи є розробка та опис нової архітектури безпечного репітера та комбінованого протоколу, який інтегрує функції шифрування та маршрутизації на канальному рівні (Layer 2).

Ключові слова: *цифровий мобільний радіозв'язок (DMR), репітер, 4FSK, шифрування, маршрутизація, канальний рівень, TDMA, протокол безпеки.*

Вступ. В останні десятиліття спостерігається стійке зростання потреби у надійних та безпечних системах професійного цифрового радіозв'язку. Потрібна гарантована та конфіденційна комунікація, стійка до перехоплення та зовнішніх перешкод. Розвиток цифрових технологій дозволив створити ефективні рішення, що відповідають цим високим вимогам. Одним із найпоширеніших світових стандартів у цій галузі є Digital Mobile Radio (DMR). Стандарт DMR, описаний у специфікації ETSI TS 102 361-1, є відкритим рішенням для професійного мобільного радіозв'язку. Його ключовою особливістю є використання технології множинного доступу з поділом часу (Time Division Multiple Access, TDMA) у стандартній смузі радіоканалу 12,5 кГц. Технологія TDMA дозволяє організувати два незалежні часові слоти (тайм-слоти) для передачі голосу або даних на одній частотній несучій, що подвоює спектральну ефективність порівняно з аналоговими системами [1].

Фундаментальну роль у побудові будь-якої радіомережі грають ретранслятори, також відомі як репітери або базові станції (БС). Їхнє основне завдання – розширення зони покриття та забезпечення сталого зв'язку між абонентами, що знаходяться на значній відстані один від одного або в умовах складного рельєфу місцевості. Однак при впровадженні криптографічного захисту мереж DMR виникає серйозне архітектурне обмеження. Стандартний репітер, працюючи із зашифрованими даними, функціонує у так званому "прозорому" режимі. Він не має доступу до ключів шифрування і, отже, не може аналізувати вміст пакетів, що проходять через нього. Ця проблема стає особливо актуальною в контексті інтеграції DMR-мереж із сучасними IoT-платформами, де потрібне гнучке керування потоками даних від різних датчиків [3].

Метою цієї статті є пропозиція нової архітектури безпечного репітера, здатного подолати описане обмеження. Пропонується модель, заснована на комбінованому протоколі, який поділяє шифрування службової інформації та даних користувача. Це дозволяє репітеру отримувати доступ до метаданих пакетів (адрес джерела та призначення, типу виклику) для виконання функцій маршрутизації, не порушуючи при цьому конфіденційності основного вмісту – голосу або текстових повідомлень.

Постановка задачі. Підвищення ефективності та гнучкості захищених радіомереж є стратегічно важливим завданням для розвитку систем професійного зв'язку. Основне протиріччя, яке необхідно вирішити, полягає в конфлікті між двома фундаментальними вимогами: необхідністю збереження наскрізного (end-to-end) шифрування та потребою у доступі до службової інформації. Стандартні підходи вирішують цю суперечність на користь

абсолютної безпеки, перетворюючи репітер на "прозорий" пристрій, нездатний до аналізу трафіку. Дана робота спрямована на пошук збалансованого рішення, яке б задовольняло обидві вимоги.

Основний зміст роботи. Для розробки нової архітектури необхідно глибоко розуміти принципи роботи існуючого стандарту DMR Tier II, який визначає протоколи для конвенційних систем радіозв'язку, які використовують репітери. Його архітектура розділена на кілька рівнів, аналогічно моделі OSI, з яких для нашого аналізу найбільш важливі фізичні (Layer 1) і канальні (Layer 2) рівні.

Фізичний рівень відповідає за передачу бітів по радіоканалу. Ключовою технологією модуляції стандарту DMR є 4-рівнева частотна маніпуляція (4-Level Frequency Shift Keying, 4FSK). Цей метод дозволяє кодувати два біти інформації (дибіт) в одному символі, що забезпечує ефективне використання спектра [4]. Швидкість передачі символів становить 4800 символів за секунду, що відповідає загальній швидкості передачі даних 9600 біт/с [1].

Кожному із чотирьох можливих дибітів (01, 00, 10, 11) відповідає певне частотне відхилення від номінальної несучої частоти. Відповідність дибітів та девіації частоти представлена в таблиці 1.

Розмір девіації частоти (D) розраховується за формулою [1]:

$$D = \frac{h}{T} \times \frac{2}{3} \qquad (1)$$

де h – індекс девіації, для DMR дорівнює 0,27;

T – тривалість одного символу (1/4800 с).

Основою стандарту є технологія TDMA, яка ділить радіоканал зі смугою 12,5 кГц на два тимчасові слоти (тайм-слоти) тривалістю 30 мс кожен. Це дозволяє підтримувати два незалежні сеанси зв'язку (наприклад, два голосові дзвінки) одночасно на одній частотній парі, що є ключовою перевагою DMR.

Таблиця 1

Відповідність дибітів та частотних відхилень у 4FSK (відповідно до [1])

Інформаційні біти (Bit 1, Bit 0)	Символ	Девіація частоти 4FSK
0 1	+3	+1,944 кГц
0 0	+1	+0,648 кГц
1 0	-1	-0,648 кГц
1 1	-3	-1,944 кГц

Канальний рівень організує передачу даних у вигляді структурованих пакетів (bursts), які поміщаються у тимчасові слоти TDMA. Стандарт визначає кілька типів пакетів, основними з яких є голосовий пакет (voice burst) та пакет даних/управління (data burst).

Голосові дзвінки передаються у вигляді голосових суперкадрів (voice superframe), що складаються з шести послідовних пакетів, які позначаються літерами від A до F. Така структура має тривалість 360 мс (6×30 мс на перший слот + 6×30 мс на другий слот). Пакет A завжди містить 48-бітову синхропослідовність (SYNC), яка використовується для синхронізації приймача. Пакети з B по F замість повної синхропослідовності містять поле вбудованих сигнальних даних (embedded signalling), що використовується для передачі низькошвидкісної службової інформації під час голосового виклику [1].

Пакет даних має схожу структуру, але використовується для передачі як даних користувача (наприклад, текстових повідомлень, GPS-координат), так і керуючої інформації (наприклад, заголовків виклику). Він також містить поле корисного навантаження (Info) і синхропослідовність або вбудовані дані. Важливим елементом пакета даних є поле типу слота (Slot Type), яке містить інформацію про тип даних, що передаються (наприклад, голосовий заголовок, дані з підтвердженням, CSBK).

Адресація DMR здійснюється за допомогою 24-бітових ідентифікаторів. Кожен пакет містить ID джерела (Source ID) та ID призначення (Destination ID). Адреса призначення може бути індивідуальною (адресованою однією радіостанцією) або груповою, яка в DMR називається розмовною групою (Talk Group). Це дозволяє організовувати групові дзвінки, де передачу чують усі радіостанції, налаштовані на відповідний груповий ID [1].

У режимі DMR Tier II репітер (BS) виконує роль центрального вузла, що координує зв'язок. Він приймає сигнал від мобільної станції (MS) на вхідній частоті (inbound) та одночасно передає його на вихідній частоті (outbound). Для керування доступом до каналу репітер використовує Загальний канал сповіщення (Common Announcement Channel, CACH), який передається в коротких проміжках між основними тайм-слотами у вихідному потоці. Через CACH репітер повідомляє абонентам про стан вхідного каналу (вільний чи зайнятий), що дозволяє уникнути колізій [1].

Коли в мережі використовується шифрування, робота репітера кардинально змінюється. Оскільки він не має ключів шифрування, він не може декодувати ні корисне навантаження, ні більшість полів канального рівня, включаючи адреси джерела та призначення. Репітер здатний синхронізуватися з потоком даних та визначити базову структуру пакета, але вся зашифрована частина ретранслюється без будь-яких змін. Цей принцип роботи, відомий як "Ретрансляція сигналу основної смуги без дешифрування" [2], забезпечує високий рівень безпеки, але перетворює репітер на простий пристрій посилення і перенаправлення сигналу, позбавлений будь-якої мережної логіки.

Пропонована архітектура є еволюційним розвитком стандартного підходу. Вона спрямована на те, щоб наділити репітер необхідними функціями для аналізу та маршрутизації трафіку, не порушуючи при цьому фундаментального принципу наскрізного захисту конфіденційних даних користувача.

Функціональна схема запропонованого репітера включає стандартні компоненти, такі як модуль ВЧ, модем 4FSK і модуль прямого виправлення помилок (FEC). Ключове нововведення полягає в центральному блоці – "Модулі обробки протоколу та безпеки" . Цей модуль працює на канальному рівні (Layer 2) та є ядром запропонованої архітектури. В основі архітектури лежить комбінований протокол, який використовує дворівневу модель шифрування. Ця модель розділяє захист службової інформації та даних користувача.

1. Мережеве шифрування (Network Encryption): заголовок пакета даних, що містить ID джерела, ID призначення, тип пакета та іншу службову інформацію, шифрується із використанням ключа мережі. Цей ключ є спільним для всіх пристроїв у межах однієї логічної мережі (або домену безпеки) та відомий репітеру.

2. Наскрізне шифрування (End-to-End Encryption): корисне навантаження пакета (голосовий кадр або дані користувача) шифрується з використанням абонентського ключа. Цей ключ відомий лише кінцевим користувачам (відправнику та одержувачу/групі одержувачів) і недоступний репітеру.

Процес обробки вхідного пакета на репітері виглядає так:

1. Сигнал 4FSK приймається та демодулюється.
2. Виконується декодування із виправленням помилок (FEC).
3. З потоку витягується пакет даних канального рівня.
4. "Модуль обробки протоколу та безпеки" дешифрує заголовок пакета, використовуючи мережевий ключ.
5. Модуль аналізує дешифрований заголовок: зчитує ID джерела, ID призначення та тип даних.
6. На основі правил маршрутизації приймається рішення: ретранслювати пакет без змін, заблокувати пакет, перенаправити пакет до іншої розмовної групи або IP-мережі (шлюзування).
7. Формується новий заголовок (при необхідності) і шифрується відповідним мережевим ключем вихідного каналу.
8. Новий зашифрований заголовок поєднується з вихідним, незайманим зашифрованим корисним навантаженням.
9. Сформований пакет проходить процедуру кодування FEC і передається на модулятор для відправки в ефір.

Порівняння стандартного та запропонованого підходів до обробки зашифрованого пакету наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння процесів обробки зашифрованого пакета

Етап обробки	Стандартний репітер (прозорий режим)	Пропонований безпечний репітер
Прийом та демодуляція	Демодуляція сигналу 4FSK	Демодуляція сигналу 4FSK
Декодування FEC	Виконується	Виконується

Аналіз заголовка	Не виконується (заголовок зашифрований)	Дешифрування заголовка (мережевий ключ)
Рішення про маршрутизацію	Відсутнє (проста ретрансляція)	Приймається на основі даних заголовка
Обробка корисного навантаження	Не виконується (ретрансляція "як є")	Не виконується (ретрансляція "як є")
Формування пакету	Просте копіювання	Формування нового заголовка, шифрування
Кодування FEC та передача	Виконується	Виконується

Будь-яка нова архітектура має бути оцінена з погляду її впливу на ключові параметри продуктивності системи та надійність захисту інформації. Впровадження додаткових криптографічних операцій на репітері потенційно може позначитися на затримці та створити нові вектори атак.

Основним джерелом додаткової затримки є операції дешифрування та подальшого шифрування заголовка пакета. Однак сучасні процесори обробки сигналів, такі як CML CMX7031, здатні виконувати подібні криптографічні операції за дуже короткий час [5]. Затримка на обробку в інтерфейсі C-BUS таких пристроїв може становити до 250 мкс. Навіть з урахуванням виконання симетричного алгоритму шифрування (наприклад, AES) для невеликого обсягу даних (заголовок DMR становить кілька десятків байт), загальний час обробки вимірюватиметься мікросекундами. Ця величина дуже мала в порівнянні з загальною тривалістю тимчасового слота DMR, яка становить 30 мс (30 000 мкс). Таким чином, вплив на загальну затримку мережі буде незначним.

Пропускна здатність радіоканалу визначається параметрами фізичного рівня: типом модуляції (4FSK), швидкістю символів (4800 симв/с) та шириною каналу (12,5 кГц). Запропонована архітектура не вносить жодних змін до цих параметрів. Структура TDMA із двома слотами також зберігається. Отже, теоретична пропускна спроможність мережі залишається незмінною.

Надійність передачі в радіоканалі, в першу чергу, залежить від відношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR), яке характеризує якість сигналу. Залежність ймовірності бітової помилки (Bit Error Rate, BER) від SNR для модуляції 4FSK є фундаментальною характеристикою фізичного рівня, що показано на рисунку 1. Запропоновані зміни на канальному рівні не впливають на цю залежність. Для успішного декодування пакета (включаючи заголовок) на репітері потрібен той самий рівень SNR, що й на кінцевому абонентському пристрої.

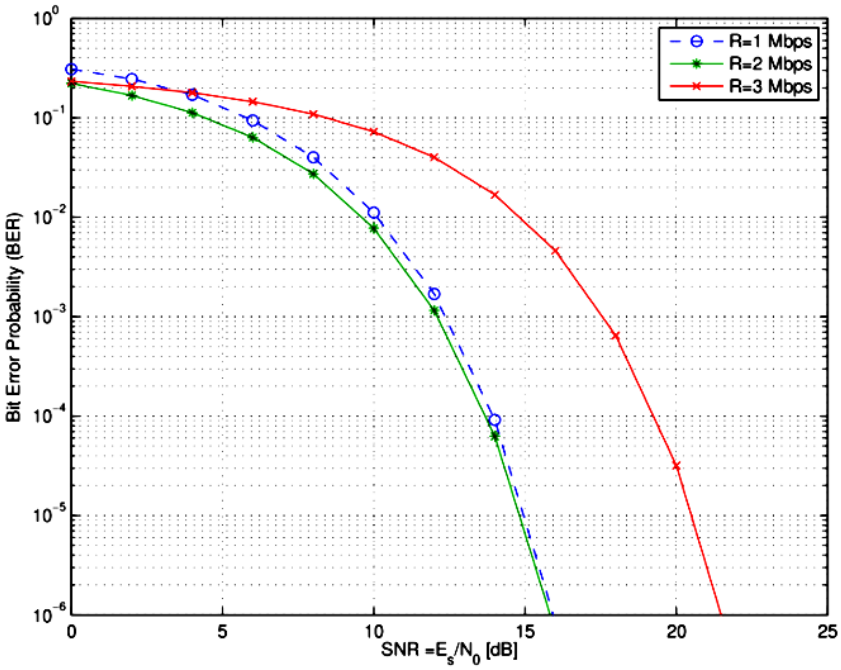


Рис. 1. Типова залежність BER від SNR для модуляції 4FSK

Відношення сигнал/шум у децибелах розраховується як [6]:

$$SNR_{db} = 10 \times \log 10 \frac{\eta_s}{\eta_z} \tag{2}$$

де η_s – потужність корисного сигналу;

η_z – потужність шуму.

На надійність зв'язку також впливають зовнішні чинники, такі як багатопроменеве поширення та доплерівський зсув частоти, що виникає під час руху абонента. Доплерівський зсув (δ) для односпрямованого каналу зв'язку розраховується за формулою [7]:

$$\delta = \frac{v \times f_c}{c} \tag{3}$$

де v – відносна швидкість руху;

f_c – несуча частота;

c – швидкість світла.

Важливо, що в мобільних сценаріях некомпенсований доплерівський зсув може погіршити продуктивність демодулятора 4FSK через зміщення частоти, проте запропоновані архітектурні зміни на канальному рівні не змінюють фундаментальну схильність до фізичного рівня цього ефекту.

Аналіз безпеки запропонованої моделі показує, що вона зберігає високий рівень захисту за умови правильної реалізації. Основна перевага моделі полягає в тому, що корисне навантаження (голос та дані) залишається захищеним наскрізним шифруванням. Репітер не має доступу до абонентських ключів та не може розшифрувати вміст повідомлень. Це повністю відповідає вимогам захисту приватної інформації. Порівняно зі стандартною архітектурою, з'являється новий вектор атаки – компрометація ключа мережі, що зберігається на репітері. Якщо зловмисник отримає доступ до цього ключа, він зможе:

– дешифрувати заголовки пакетів та аналізувати метадані трафіку (хто з ким і коли спілкується);

– здійснювати атаки на маршрутизацію, наприклад, створювати помилкові пакети з коректно зашифрованим заголовком для виклику DoS-атак або перенаправлення трафіку. Однак навіть у цьому випадку зловмисник не отримає доступу до переговорів.

Для мінімізації ризиків необхідно впровадити сувору систему керування ключами. Це передбачає використання безпечних протоколів для ініціалізації ключів (provisioning), періодичну зміну мережного ключа обмеження наслідків компрометації репітера, і навіть поділ каналів управління ключами та каналів передачі. Фізична безпека репітерного обладнання також набуває критичного значення.

У даний час в системах цифрового радіозв'язку з шифруванням домінує модель, коли ретранслятори працюють в "прозорому" режимі. Вони функціонують за принципом "bent-pipe" ("вигнута труба"), приймаючи, підсилюючи та перевипромінюючи зашифрований сигнал без будь-якого аналізу його вмісту. Цей підхід гарантує наскрізну безпеку, але ціною повної втрати керованості трафіком на мережевому рівні .

Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексного архітектурного підходу та протокольної моделі для інтелектуального безпечного репітера, де криптографічні перетворення органічно інтегровані у логіку маршрутизації на канальному рівні в рамках стандарту DMR.

Висновки. У ході цієї роботи було досліджено проблему обмеженої функціональності стандартних репітерів у захищених цифрових радіомережах та запропоновано її комплексне рішення.

Основним результатом роботи є розробка нової архітектури безпечного репітера для мереж стандарту DMR. Запропонована архітектура ґрунтується на комбінованому протоколі, який реалізує дворівневу модель шифрування. Ця модель поділяє криптографічний захист службової інформації (заголовків пакетів) та даних користувача (корисного навантаження). Заголовки шифруються із використанням загального мережевого ключа, доступного репітеру, тоді як корисне навантаження захищене наскрізним шифруванням із застосуванням ключів, відомих тільки кінцевим абонентам.

Такий підхід дозволяє репітеру виконувати часткове дешифрування пакетів для отримання адресної інформації, необхідної для прийняття

інтелектуальних рішень про маршрутизацію, фільтрацію або шлюзування трафіку. При цьому конфіденційність даних користувача повністю зберігається, оскільки репітер не має доступу до їх вмісту. Аналіз продуктивності показав, що додаткове обчислювальне навантаження на репітер не вносить значних затримок і не знижує пропускну здатність мережі. Аналіз безпеки підтвердив, що за належної організації системи управління ключами запропонована модель забезпечує високий рівень захисту.

Таким чином, розроблена архітектура дозволяє подолати фундаментальне обмеження стандартних систем, значно підвищуючи гнучкість керування трафіком у зашифрованих мережах DMR. Запропоноване рішення є життєздатним та перспективним напрямком для еволюції систем професійного мобільного радіозв'язку, де вимоги як до безпеки, так і до функціональності постійно зростають.

Доповідь підготовлено в рамках проєкту 2025.06/0047 «Інформаційні технології криптографічного захисту й автентифікації даних для систем мобільного та супутникового зв'язку». Проєкт фінансується Національним фондом досліджень України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ETSI TS 102361-1 V2.2.1. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: Air Interface (AI) protocol. – Sophia Antipolis: ETSI, 2013. – 177 с.
2. VHF/UHF Repeater Radio D4741/D4745. Product Data Sheet. – Ankara: Aselsan.
3. Popov, A., et al. Integration of Digital Mobile Radio Sensor Networks with MQTT-based IoT platforms // Sixteenth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2022) – 2022. – с. 30–36.
4. Murray T. Four frequency-shift keying (4-FSK) spread spectrum modulator i demodulator: Master's Thesis. – Monterey: Naval Postgraduate School, 1993. – 101 с.
5. CML Microsystems Plc. 4FSK Radio Processor CMX7031/CMX7041. Data Sheet. – Maldon: CML, 2011. – 58 с.
6. Marin, J. Multifunction Full-Duplex Transceivers: Doctoral dissertation. - Tampere: Tampere University, 2024. – 218 с.
7. Marin J. et al. Full-duplex capable multifunction joint radar-communication-security transceiver with pseudonoise-OFDM mixture waveform // IET Radar, Sonar & Navigation – 2024.
8. ETSI TS 102490 V1.6.1. Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio. – Sophia Antipolis: ETSI, 2010. – 65 с.

УДК 004.056.5

О.В. Кручінін[1], М.К. Чурсина[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО ВИЯВЛЕННЯ DNS-ТУНЕЛЮВАННЯ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ КІБЕРЗАХИСТУ

Анотація. Сформульовано актуальність проблеми використання DNS-тунелювання як ключового вектора кібератак. Проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми, наукових підходів до її дослідження та порівняльний аналіз методів детекції за показниками ефективності та обчислювальними витратами. Визначено основні виклики та обмеження існуючих систем виявлення вторгнень, що обґрунтовує необхідність розробки нових методик на базі машинного навчання.

Ключові слова: *DNS-тунелювання, машинне навчання, приховані канали, кіберзагрози, виявлення вторгнень.*

Вступ. Система доменних імен (DNS) є фундаментальним компонентом інтернет-інфраструктури, що робить її пріоритетним вектором для кібератак. Згідно з сучасними аналітичними звітами, частота та складність атак, що використовують DNS, зростають експоненційно. Серед них особливу загрозу становить DNS-тунелювання – техніка створення прихованих каналів для несанкціонованого виведення даних або дистанційного управління.

Метою даної роботи є системний аналіз сучасного стану проблеми DNS-тунелювання, класифікація існуючих підходів до її вирішення та формування на цій основі обґрунтування для розробки власної методики детекції на основі машинного навчання.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані та вирішені наступні завдання:

- дослідити сучасний стан та масштаби проблеми DNS-безпеки на основі актуальних статистичних даних;
- проаналізувати наукові підходи до дослідження явища DNS-тунелювання;
- провести порівняльний аналіз класифікаційних підходів до DNS-тунелювання;
- виявити ключові проблеми та виклики, пов'язані з виявленням DNS-тунелювання;
- здійснити порівняльний аналіз ефективності сучасних систем детекції.

Основний зміст роботи. Аналіз сучасного стану проблеми підтверджує, що DNS-атаки є провідним вектором загроз у кіберпросторі. Згідно з даними ENISA Threat Landscape 2024 [1], у першому кварталі 2024 року спостерігалось 80% зростання атак на DNS порівняно з попереднім періодом. Статистика провідних компаній свідчить про системність цього явища: частка DNS-орієнтованих атак досягла 54% усіх L3/4-інцидентів, що еквівалентно 1,7 мільйонам атак [2, 3]. Економічний вплив є значним: дослідження Forrester [4] зазначає, що 95% організацій зазнали DNS-інцидентів, а середній прямий фінансовий збиток перевищує 1 млн дол. США на організацію.

Для систематизації механізмів реалізації було виконано класифікацію DNS-тунелювання, узагальнення яких відображено у Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика підходів до DNS-тунелювання

Критерії класифікації	Категорії тунелів	Ключові характеристики	Ефективність детекції
Складність реалізації [5]	Прості	Пряме інкапсулювання, низька ентропія	Висока (статистичний аналіз)
	Реальні	Динамічні субдомени, Base32/64	Середня
	Евазійні	DGA, шифрування, маскування	Низька (ML/AI)
Функціональне призначення [6]	Легітимні	Тестування, адміністрування	-
	Зловмисні (ексфільтрація)	Регулярна передача даних	Висока
	Зловмисні (C&C)	Низька активність, стабільні закономісності	Дуже низька

Проведена класифікація дозволяє структурувати явище DNS-тунелювання за двома ключовими векторами: технічною складністю та цільовим призначенням. Аналіз таблиці 1 демонструє, що технічні реалізації тунелів варіюються від елементарних, які піддаються статистичному аналізу, до високоевазійних з використанням DGA та шифрування, що робить їх практично невразливими до традиційних методів детекції. Одночасно, функціональна класифікація виокремлює принципову відмінність між легітимним використанням, зловмисною ексфільтрацією даних та прихованими каналами управління (C&C), що мають різні поведінкові патерни. Таким чином, узагальнення класифікаційних підходів засвідчує багатоаспектність загрози DNS-тунелювання, де спостерігається пряма залежність: зростання технічної складності реалізації та зниження активності тунелю (від ексфільтрації до C&C) призводять до експоненційного ускладнення їх виявлення. Це обумовлює неможливість створення універсального детектора та необхідність розробки комбінованих методик, що враховують як протокольні, так і поведінкові ознаки в конкретному контексті.

Аналіз сучасних викликів для сучасних систем виявлення вторгнень (IDS) показав, що складність виявлення зумовлена низкою взаємопов’язаних факторів:

- Поширення шифрування (DoH/DoT): Інкапсуляція DNS у HTTPS [7] унеможливлює глибинний аналіз пакетів (DPI), позбавляючи системи моніторингу ключових статистичних ознак.
- Архітектурна універсальність DNS: Добре налаштовані тунелі імітують легітимний трафік, маючи низький рівень шуму та стабільні параметри, що унеможливлює створення універсальних сигнатур [8].

- Динамічна еволюція атак: Спектр реалізацій тунелів значно розширився (від TXT-запитів до гібридних A/TXT/CNAME-комбінацій), що вимагає постійного оновлення ознак у ML-моделях [9].
- Обмеження машинного навчання: Більшість моделей страждає від перенавчання, дисбалансу даних (легітимні запити переважають) та "дрейфу концепцій" у реальних умовах, що обмежує їхню довготривалу ефективність [10].

Урахування зазначених викликів дає змогу оцінити практичну ефективність існуючих методів виявлення та зрозуміти, наскільки вони здатні компенсувати виявлені обмеження. Тому наступним кроком є порівняльний аналіз сучасних підходів, що різняться як за точністю класифікації, так і за вимогами до ресурсів. Для оцінки практичної придатності цих методів було проведено аналіз сучасних систем виявлення DNS-тунелювання, результати якого наведені в Таблиці 2.

Порівняльний аналіз представлених у таблиці 2 методів виявлення DNS-тунелювання дає змогу простежити загальні закономірності співвідношення ефективності та обчислювальної складності. Найвищі показники точності (Accuracy до 0.99) та мінімальну частку помилкових спрацьовувань (FPR до 0.01) демонструють глибинні та гібридні моделі, однак це супроводжується значним збільшенням часу обробки (до 700 мс) та потребою у високопродуктивних ресурсах, таких як GPU. На противагу цьому, статистичні методи та класичні ML-моделі залишаються більш придатними для систем із обмеженими можливостями, проте поступаються в адаптивності до шифрованих або нових типів трафіку. Виникає чіткий компроміс між інтерпретованістю моделі, де простіші підходи забезпечують зрозумілість рішень, та її здатністю виявляти складні поліморфні атаки, як це роблять моделі-«чорні скриньки» на основі глибинного навчання. Таким чином, вибір методу детекції в реальних умовах є компромісом між точністю, швидкодією, ресурсомісткістю та здатністю до пояснення прийнятих рішень.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз сучасних методів виявлення DNS-тунелювання

Клас підходів	Метрики				Latency, мс	Вимоги до ресурсів
	A	P	R	FPR		
Статистичні моделі [11]	0.86	0.8	0.75	0.12	≈ 50	Низькі
Класичні ML-моделі [12]	0.93	0.91	0.90	0.06	≈ 120	Середні
Глибинне навчання [13,14]	0.97-0.98	0.96-0.97	0.91-0.96	0.02-0.05	≈ 300 – 500	Високі (GPU)
Гібридні системи [15]	0.99	0.98	0.98	0.01	≈ 400 – 700	Дуже високі (GPU/TPU)

Примітка: Умовні позначення до метрик: A – Accuracy, P – Precision, R – Recall, FPR – False-Positive Rate.

Наукова новизна полягає у комплексному підході до аналізу DNS-тунелювання, що поєднує три рівні дослідження: систематизацію класифікацій за технічною складністю та функціональним призначенням; виявлення причинно-наслідкових зв'язків між архітектурними вразливостями DNS та ефективністю методів детекції; аналіз компромісів між точністю, швидкодією та ресурсомісткістю сучасних систем виявлення.

Висновки. На основі проведеного аналітичного огляду можна дійти висновку, що проблема DNS-тунелювання є актуальною та системною загрозою кібербезпеці, що підтверджується статистикою зростання атак, їхнім значним економічним впливом та увагою з боку міжнародних регуляторів. Структурні вразливості протоколу DNS, такі як відсутність вбудованої автентифікації та шифрування, роблять його ідеальним середовищем для створення прихованих каналів, а еволюція інструментів зловмисників у бік використання DGA та шифрування ускладнює їхнє виявлення традиційними сигнатурними методами. Порівняльний аналіз сучасних методів детекції засвідчив, що жоден з них не є універсальним, і існує прямий компроміс між точністю класифікації, швидкодією та обчислювальними витратами, причому найефективніші з них є найбільш ресурсоємними. Найбільш перспективним напрямком для подолання існуючих обмежень є розробка гібридних та адаптивних систем, здатних враховувати як структурні, так і поведінкові ознаки трафіку в умовах шифрування та динамічно змінюваних патернів атак. Саме на подолання цих викликів та створення збалансованого рішення буде спрямована подальша розробка вдосконаленої методики виявлення на базі машинного навчання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ENISA. September, 2024. ENISA Threat Landscape 2024. URL: https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/2024-11/ENISA%20Threat%20Landscape%202024_0.pdf
2. Yoachimik, O., & Pacheco, J. 2023. DDoS threat report for 2023 Q3. Cloudflare Blog. URL: https://blog.cloudflare.com/ddos-threat-report-2023-q3
3. Dummer, S., & Rath, S. 2024. A Retrospective on DDoS Trends in 2023 and Actionable Strategies for 2024. Akamai Blog. URL: https://www.akamai.com/blog/security/a-retrospective-on-ddos-trends-in-2023
4. Forrester Research, Inc.. 2025, July. FORRESTER OPPORTUNITY SNAPSHOT: A CUSTOM STUDY COMMISSIONED BY EFFICIENTIP. Embrace DNS Security And Overcome Hurdles Of Cloud Adoption. URL: https://efficientip.com/wp-content/uploads/2025/07/Efficient_IP-OSnap-v3-Final.pdf?utm_source=facebook&utm_medium=organic_social&utm_campaign=253dnstr-smo-forrester-wp&utm_term=dns&utm_content=analyst_report
5. Tatang, D., Quinkert, F., Dolecki, N., & Holz, T. (2019). A study of newly observed hostnames and DNS tunneling in the wild. arXiv preprint arXiv:1902.08454. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.08454
6. Wang, Y., Zhou, A., Liao, S., Zheng, R., Hu, R., & Zhang, L. (2021). A comprehensive survey on DNS tunnel detection. Computer Networks, 197, 108322. URL: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108322

7. Dawood, M., Tu, S., Xiao, C., Haris, M., Alasmary, H., Waqas, M., & Rehman, S. U. (2024). The impact of Domain Name Server (DNS) over Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) on cyber security: limitations, challenges, and detection techniques. Computers, Materials and Continua, 80(3), 4513-4542. URL: https://doi.org/10.32604/cmc.2024.050049
8. Caviglione, L. (2021). Trends and challenges in network covert channels countermeasures. Applied Sciences, 11(4), 1641. URL: https://doi.org/10.3390/app11041641
9. Khadse, M. A., & Dakhane, D. M. (2025). A Review on Network Covert Channel Construction and Attack Detection. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 37(1), e8316. URL: https://doi.org/10.1002/cpe.8316
10. Elsadig, M. A., & Gafar, A. (2022). Covert channel detection: machine learning approaches. IEEE Access, 10, 38391-38405. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164392
11. Khodjaeva, Y., & Zincir-Heywood, N. (2021, August). Network flow entropy for identifying malicious behaviours in DNS tunnels. In Proceedings of the 16th International Conference on Availability, Reliability and Security (pp. 1-7). URL: https://doi.org/10.1145/3465481.3470089
12. Miglani, J., & Thorpe, C. (2021, June). Employing machine learning paradigms for detecting DNS tunnelling. In Proc. 20th Eur. Conf. Cyber Warfare Secur.(ECCWS) (pp. 1-8).
13. Palau, F., Catania, C., Guerra, J., Garcia, S., & Rigaki, M. (2020). DNS tunneling: A deep learning based lexicographical detection approach. arXiv preprint arXiv:2006.06122. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.06122
14. Sui, Z., Shu, H., Kang, F., Huang, Y., & Huo, G. (2023). A Comprehensive Review of Tunnel Detection on Multilayer Protocols: From Traditional to Machine Learning Approaches. Applied Sciences, 13(3), 1974. URL: https://doi.org/10.3390/app13031974
15. Zuo, M., Guo, C., Xu, H., Zhang, Z., & Cheng, Y. (2025). METC: A Hybrid Deep Learning Framework for Cross-Network Encrypted DNS over HTTPS Traffic Detection and Tunnel Identification. Information Fusion, 121, 103125. URL: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103125

УДК 004.67

Б.В. Молодець[1], Д.О. Савенко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЗБОРУ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ З НАЗЕМНИХ СТАНЦІЙ ДЛЯ ОПОВІЩЕННЯ ПРО ЕКОЛОГІЧНУ НЕБЕЗПЕКУ

Анотація. Описано технології збору та обробки інформації з наземних станцій моніторингу якості повітря, відкритих джерел та процес її розробки. Запропоновані структура база даних, в якості системи управління базою даних було обрано SQLite та інструменти об’єктно-реляційного відображення SQLAlchemy, надано опис моделей даних, які зберігаються та аналізуються в системі. Продемонстровано реалізацію клієнт-серверного рішення технологічний стек Python, Flask, Streamlit. Описано підходи збереження швидкодії

такі як використання фонових задач та кешування. Наведені приклади користувацького інтерфейсу та стисло описана мапа системи.

***Ключові слова**: інформаційна технологія, моніторинг якості повітря, веб-застосунок, Streamlit, Flask, SQLite, REST API.*

Вступ. Забруднення атмосферного повітря є глобальною проблемою, яка впливає на здоров'я населення та якість життя. Для України проблема загострюється через промислові викиди, інтенсивність транспортного руху та таких сезонних чинників як спалювання сухої рослинності. Також внаслідок ракетних ударів по промислових об'єктах і складах в повітря піднімаються значні обсяги продуктів горіння та пилові хмари насичені шкідливими речовинами. Тому створення системи моніторингу та оповіщення є актуальним та доступних, через наявність платформ зі збору даних.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- проаналізувати існуючі системи моніторингу стану;
- визначити функціональні та нефункціональні вимоги системи;
- запропонувати та реалізувати базу даних для збору та подальшої обробки даних з наземних станцій;
- інтегрувати можливості фільтрації, експорту даних та статистичного аналізу для поглибленого вивчення екологічної ситуації;
- запропонувати технологічний стек за допомогою якого буде проведено збір та обробку даних;
- створити серверну частину для збору, зберігання та обробки даних із зовнішніх джерел;
- розробити клієнтську частину системи для відображення даних про якість повітря.

Основний зміст роботи. Було проведено попередньо аналіз існуючих вітчизняних (SaveEcoBot, Eco-City) та закордонних (AirNow, EAQI) систем моніторингу стану повітря [1 - 4]. Ці системи оповіщення про екологічні загрози демонструють значний прогрес у напрямку моніторингу якості повітря та інформування населення. Проте виклики, пов'язані з покриттям, стандартизацією даних, персоналізацією та безпекою, залишаються актуальними.

Проаналізувавши потреби користувачів системи, були визначені функціональні вимоги системи, які представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Функціональні вимоги до системи

Вимога	Опис
Збір та обробка даних про якість повітря	Система повинна забезпечувати автоматичний збір даних із наземних станції

	або існуючі системи агрегації даних таких як SaveEcoBot, OpenAQ та Eco-City.
Візуалізація даних у реальному часі	Система має надавати користувачам зручний інтерфейс для відображення даних про якість повітря у інтуїтивній зрозумілій формі
Оповіщення користувачів про зміни	Користувачі повинні отримувати автоматичні повідомлення про перевищення встановлених порогових значень забруднювачів
Фільтрація даних	Система повинна дозволяти користувачам фільтрувати дані за параметрами (наприклад, PM2.5, NO2), часовими інтервалами, джерелами та значеннями

В таблиці 2 продемонстровано нефункціональні вимоги до системи, які демонструють як повинна працювати розроблена інформаційна система.

На основі аналізу функціональних вимог до системи, було обрано технологічний стек, що відповідає сучасним стандартам розробки веб-додатків та обробки даних про якість повітря.

Для реалізації серверної частини системи було використано мову програмування Python, який забезпечить ефективний та аналіз та обробку даних за допомогою наступних бібліотек:

- pandas – бібліотека для роботи з табличними даними, дозволяючи виконувати фільтрацію, групування та агрегацію вимірювань;
- requests – бібліотека для взаємодія з HTTP API;
- plotly – бібліотека для візуалізацію даних у вигляді інтерактивних графіків, теплових карт та діаграм;
- threading – бібліотека для виконання задач у фоновому режимі;
- numpy – бібліотека для створення синтетичних даних, необхідних для проведення Unit – тестування системи.

Таблиця 2

Нефункціональні вимоги до системи

Вимога	Опис
Доступність та інтуїтивність інтерфейсу	Інтерфейс системи має бути зрозумілим для широкого кола користувачів, включаючи осіб без технічної підготовки
Масштабованість та продуктивність	Система повинна обробляти великі обсяги даних без значних затримок. Забезпечувати швидкодію навіть при великій кількості точок моніторингу
Надійність та стабільність	Система має працювати безперебійно, автоматично оновлюючи дані та очищаючи застарілі записи [5]

Безпека даних	Гарантувати захист персональних даних користувачів, таких як підписки на сповіщення.

В якості серверний фреймворку було використано Flask [6], який є легковаговим і дозволяє створювати REST API з мінімальними затратами ресурсів. На базі нього створювалась маршрутизація і обробка запитів, необхідних для передачі даних та управління підписками на сповіщення.

Для зберігання даних вимірювання, географічних координат вимірювальних станцій та даних підписок було обрано компактну реляційну систему SQLite, що не потребує окремого серверного процесу. В якості інструменти об'єктно-реляційного відображення (ORM) було використано SQLAlchemy, що спростило взаємодію з моделями та дає підтримку та спрощення потенційного переходу до інших систем управління базами даних у разі масштабування, надаючи рівень абстракції над SQL-запитами [7].

На рисунку 1 продемонстровані моделі даних, які включають:

- MonitoringPoint представляє точку моніторингу з атрибутами id, name, latitude, longitude, source_id та source_type. Має зв'язок один-до-багатьох з класом MonitoringData.
- MonitoringData відповідає за зберігання даних вимірювань з атрибутами id, point_id (зовнішній ключ до MonitoringPoint), timestamp, parameter, value та unit.
- UserSubscription описує підписку користувача на сповіщення з атрибутами id, device_id, point_id, parameter, threshold та created_at.

Моделі пов'язані з користувачем були реалізовані за допомогою Flask-Login, який забезпечує базову модель користувача та механізм керування сеансами «з коробки».

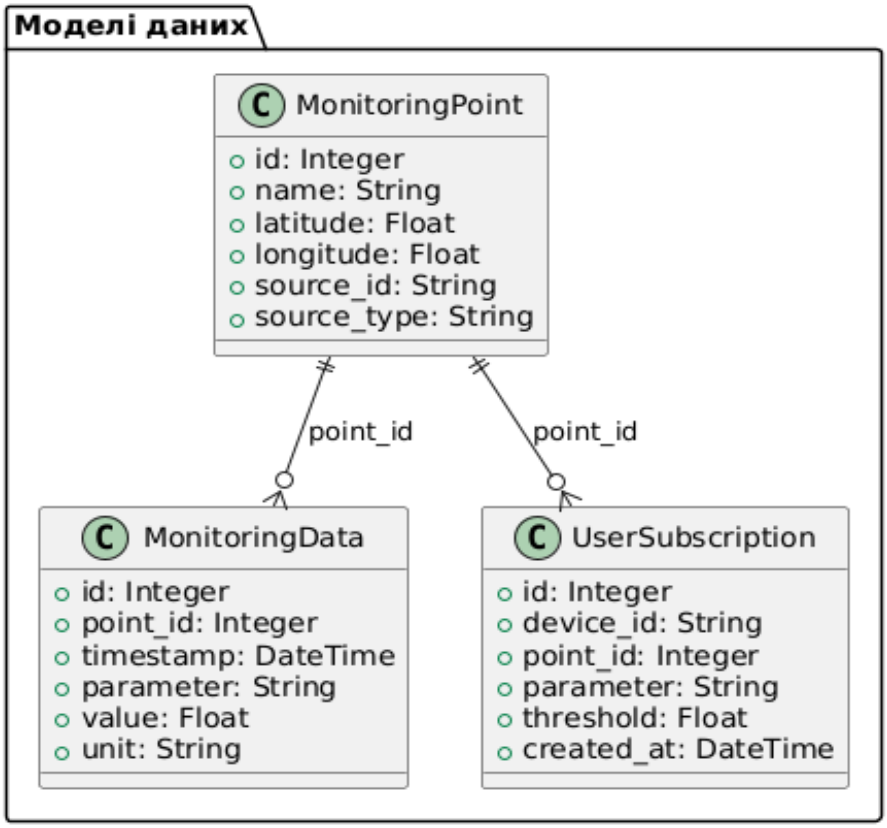


Рис. 1. Моделі даних, реалізовані в серверній частині системи за допомогою SQLAlchemy

Для забезпечення актуальності даних та швидкодії системи було дві «важкі» задачі було реалізовано як фонові задач, які працюють у окремих потоках:

- Перевірка порогових значень і відправка сповіщень;
- Архівування даних, старших за 30 днів.

  Ці задачі виконуються асинхронно, що дає змогу розвантажити потік обробки запитів.

Клієнтський модуль реалізовано з використанням фреймворку Streamlit [8], який забезпечує створення інтерактивного веб-інтерфейсу, який змінює стан компонентів на сервері та використовує WebSocket для двосторонньої комунікації. Клієнтський модуль також включає механізми кешування (за допомогою декораторів st.cache_data та st.cache_resource у Streamlit), що зменшує кількість запитів до сервера та підвищує швидкодію інтерфейсу.

Інтерфейс системи побудовано за принципом навігації вкладок, що дозволяє логічно організувати функціонал і уникнути перевантаження інформацією. Основний екран поділено на три вкладки: Карта моніторингу, Аналіз даних та Статистика. На рисунку 2 представлена вкладка "Карта моніторингу", що є основною точкою входу для користувача. Вона призначена для відображення географічного розташування точок моніторингу якості повітря та детальної інформації про вибрану станцію.

Рис. 2. Приклад розробленого користувацького інтерфейсу – вкладка «Карта моніторингу»

Розроблена система пропонує поглиблені аналітичні інструменти, такі як теплові карти, часові ряди та добовий аналіз, що робить її цінним інструментом для громадського та професійного використання.

Наукова новизна полягає в інтеграції сучасних технологій (Flask, SQLAlchemy та інше) для створення модульної системи, яка поєднує зручний інтерфейс із потужними аналітичними можливостями. Новизна також проявляється у реалізації механізму автоматичних сповіщень, який дозволяє користувачам налаштовувати персоналізовані порогові значення для ключових параметрів (PM2.5, PM10, AQI тощо) та отримувати повідомлення відповідно у реальному часі.

Висновки. Розроблена інформаційна система є ефективним рішенням для моніторингу якості повітря, яке поєднує сучасні технології, зручний інтерфейс і практичну цінність. Подальший розвиток також може охоплювати додавання нових джерел даних, таких як супутникові знімки чи власні IoT-датчики. Ці вдосконалення забезпечать конкурентоспроможність системи на ринку екологічних технологій і її адаптацію до реальних умов експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. SaveEcoBot. Українська система моніторингу якості повітря. URL: https://www.saveecobot.com (дата звернення: 14.11.2025)

2. Eco-City. Автоматизована мережа моніторингу якості повітря в Україні. URL: https://eco-city.org.ua (дата звернення: 14.11.2025)
3. AirNow. Система моніторингу якості повітря Агентства з охорони навколишнього середовища США. URL: https://www.airnow.gov (дата звернення: 14.11.2025)
4. European Air Quality Index (EAQI). Європейське агентство з навколишнього середовища. URL: https://airindex.eea.europa.eu (дата звернення: 14.11.2025)
5. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). – Geneva: International Organization for Standardization, 2011. – 34 p.
6. Буслов Д. Ю., Спірінцев В. В. , Ширін А. Л.. "Використання фреймворків DJANGO І FLASK в мові PYTHON." *Тиждень студентської науки - 2022* : матеріали 77 студентської науково-технічної конференції (Дніпро, 16-20 травня 2022 року) – Дніпро : НТУ «ДП», 2022. – С. 337-340 URL: http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160668.
7. Berkeley, CA . The Definitive Guide to Pylons. Apress, 2009. 568 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0534-0
8. Streamlit Documentation. URL: https://docs.streamlit.io (дата звернення: 14.11.2025).

РОЗДІЛ 5

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.732

А.В. Перченко[1], І.В. Новицький[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ МАТЕРІАЛУ ДРОБИМОГО У ДПК

Анотація. У роботі проаналізовано процеси транспортування та дроблення гірничої маси з кар'єру до дробильно-перевантажувального комплексу. Показано, що характер потоку автосамоскидів не відповідає пуассонівському розподілу, що свідчить про необхідність використання імітаційного моделювання для адекватного опису системи.

***Ключові слова**: транспортування матеріалу, дроблення, стохастичний потік, пуассонівський процес, імітаційне моделювання, автосамоскиди, ДПК.*

Вступ. Об'єктом дослідження є процеси транспортування матеріалу з кар'єру та його дроблення у дробильно-перевантажувальному комплексі. При постановці та розв'язанні оптимізаційних задач управління ці процеси, відповідно до системного підходу, слід розглядати у взаємному зв'язку. Процеси транспортування матеріалу є випадковими, і їхні характеристики визначають клас моделі об'єкта та методи розв'язання оптимізаційних задач. Дослідження параметрів випадкового потоку матеріалу, що транспортується автотранспортом з кар'єру до ДПК, було виконано в умовах ЦГКЗ.

Постановка задачі. У рамках дослідження розглядається система транспортування гірничої маси з кар'єру до дробильно-перевантажувального комплексу (ДПК) із використанням автосамоскидів. Необхідно визначити статистичні характеристики міжприходових інтервалів прибуття транспорту, перевірити гіпотезу про відповідність їх експоненціальному розподілу, а отже — визначити, чи можна описати потік як пуассонівський. У разі відхилення гіпотези виникає потреба в розробці альтернативної моделі, здатної адекватно відображати реальні умови функціонування транспортної системи. Задача полягає у побудові й аналізі імітаційної моделі, яка враховує стохастичну природу процесів і дозволяє здійснювати подальшу оптимізацію системи.

Основний зміст роботи. У стабільному режимі було зафіксовано 100 інтервалів між прибуттями автосамоскидів. Дані згруповано в інтервали, обчислено частоти та побудовано емпіричну функцію розподілу (EDF). Для оцінки параметра експоненційного розподілу використано:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\bar{x}}, \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k} m_i f_i,$$

де x_i – середина інтервалу, n_i – частота.

Відповідність гіпотезі перевірялась за критерієм Колмогорова:

$$D_n = \sup_x | F_n(x) - F(x; \hat{\lambda}) |,$$

У ході перевірки гіпотези було обчислено спостережуване значення статистики Колмогорова, яке склало:

$$D = 0,13$$

При цьому критичне значення для вибірки обсягом $n = 100$ на рівні значущості $\alpha = 0,05$ становить

$$D_{\text{кр}} = 0,096$$

Оскільки $D > D_{\text{кр}}$ нульову гіпотезу про відповідність розподілу експоненційному закону було відхилено.

Це перевищення означає, що емпірична функція розподілу суттєво відрізняється від теоретичної експоненціальної, отже, нульову гіпотезу відхилено. Для наочності було побудовано графік емпіричної функції розподілу (EDF) та теоретичної експоненціальної функції розподілу (CDF), що наведено нижче.

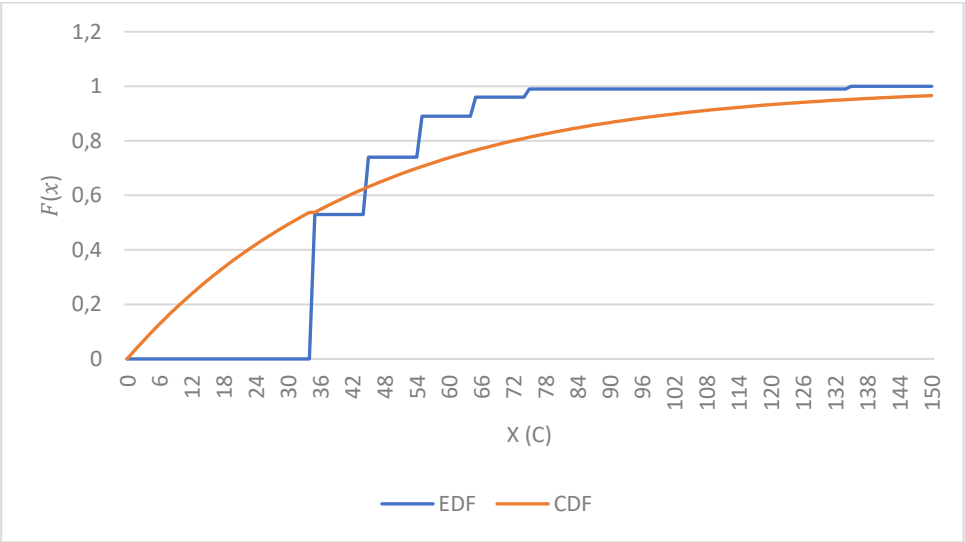


Рис. 1. Графік емпіричної функції розподілу (EDF) і теоретичної експоненціальної CDF

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що розподіл інтервалів між розвантаженнями не є експоненційним, а потік - не пуассонівський. Це означає, що використання стандартних моделей ТСМО без урахування особливостей реального процесу є некоректним. Для дослідження процесів транспортування та переробки матеріалу доцільно використовувати універсальні методи, засновані на імітаційному моделюванні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Dominique Sauter Automation in Mining, Mineral and Metal Processing 2004 (IPV - IFAC Proceedings Volume) 1st Edition lsevier Science; 1st edition (March 7, 2006) - 482 pages.
2. Luo-jian Yu and Xin Tong, Study on the technical parameters model of the functional components of cone crushers, Nonlinear Engineering 2022, 11: 175–185 pages
3. Johansson M, Quist J, Evertsson M, Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. Miner Eng. 2017, 103–104:93–101 pages.
4. Вища математика в прикладах і задачах: навчальний посібник у 2 томах. Том 2 Диференціальне та інтегральне числення функцій багатьох змінних. Диференціальні рівняння та ряди / Л. В. Курпа; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – с. 20-24, 344-352.

УДК 004.89:681.5:697:620.9

А.В. Бубліков[1], Р.А. Гурбанов[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ В БУДІВЛІ

Анотація. Розглянутий підхід щодо створення системи підтримки прийняття рішень (СППР) при керуванні споживанням електроенергії електроприладами в будівлі. Визначені завдання для створення системи, обґрунтовані методика створення енергетичного цифрового близнюка електроприладів та алгоритм оптимізації графіку їх використання.

Ключові слова: *керування споживанням електроенергії електроприладами, розумний будинок, класифікація типів електроприладів, цифровий двійник*

Вступ. У світі та, зокрема, в Україні домогосподарства стабільно становлять значну частку кінцевого енергоспоживання, що створює простір для економії за рахунок керування енергоспоживанням побутових приладів. У 2023 р. енергоспоживання домогосподарств ЄС склало 9,6 млн ТДж (-5,6% порівняно з 2022 р.), але рівень все ще високий, тож підвищення ефективності залишається політичним пріоритетом [1].

Реформована Директива ЄС з енергоефективності 2023/1791 встановлює підвищені річні цілі заощаджень до 2030 р., і підкреслює роль гнучкості попиту

та даних лічильників [2]. Отже, інструменти СППР для керування навантаженнями в будівлях безпосередньо відповідають регуляторному курсу в розвинених країнах.

Стандарт ISO 50001 оновлено у 2024 р. (Amendment 1), він інтегрує аспекти кліматичної дії й підсилює потребу в системному управлінні енергією, а СППР є природним «мозком» такої системи [3].

На рівні методів, сучасні огляди систем NILM (Non-Intrusive Load Monitoring) показують, що неінвазивне розділення споживання за приладами створює базу даних для персоналізованих рекомендацій та автоматизованих рішень (від перенесення навантажень до виявлення неефективних пристроїв) [4].

Для України ця тема також пріоритетна: міжнародні аналітики (IEA) радять прискорити розгортання смарт-лічильників/AMI і впроваджувати енергоменеджмент у будівлях, щоби підвищити гнучкість і безпеку енергосистеми — саме ті функції, які забезпечує СППР для електроприладів [5].

Постановка завдання. На основі аналізу існуючих рішень щодо керування процесом енергоспоживання в будівлі запропонувати підхід щодо побудови систем підтримки прийняття рішень для оптимізації графіка використання електроприладів з використанням їх цифрових двійників та урахуванням побажань користувачів й обмежень за тарифікацією.

Основний зміст роботи. Недоліком існуючих рішень [6-8] є те, що в систему не закладається розуміння процесів в будинку та причино-наслідковий зв’язок між ними з позиції поведінки людини. Відсутність механізму створення моделі поведінки людини унеможливлює аналіз процесів в будинку та формування порад людині щодо їх оптимізації на більш глибокому рівні, коли людина може простежити всю логіку прийняття рішення та бути більш інтегрованою в цей процес за рахунок цього, що цілком відповідає сучасній концепції Industry.5.

Для усунення цього недоліку в пропонованому підході щодо створення СППР планування використання електроприладів відбувається, з однієї сторони, з урахуванням побажань користувача та безпосередньої його участі, а з іншої – на основі виконання процедури оптимізації часового графіку використання приладів на основі їх енергетичних цифрових двійників. При цьому потрібно вирішити такі завдання:

– створити методику побудови енергетичних цифрових двійників електроприладів, що дозволяють класифікувати прилади та прогнозувати споживання ними електроенергії;

– розробити алгоритм оптимізації графіку використання електричних приладів в будівлі на основі їх цифрових двійників.

При вирішенні завдання класифікації електроприладів робота кожного електричного приладу з точки зору споживання потужності представляється хронологічною послідовністю зміни в часі його станів. Кожний стан асоціюється з конкретним режимом роботи приладу, який триває певний час, та для якого

характер споживання потужності суттєво не змінюється. Тобто, режим роботи приладу пов'язаний з певною ситуацією щодо його використання людиною.

Алгоритм класифікації електроприладів базується на встановленні закономірностей зміни у часі амплітуди імпульсів, їх періоду та шпаруватості, які приймаються за класифікаційні ознаки та є оригінальними для конкретного електроприладу. Фактично ці закономірності є відображенням хронологічної послідовності зміни станів приладу, й на їх основі будуть створені енергетичні близнюки приладів. Ці близнюки мають давати змогу точно моделювати роботу приладів, прогнозувати їх характер роботи з позиції споживання потужності в певні моменти часу. В залежності від характеру користування електроприладом людиною хронологічна послідовність зміни його стану може бути різною, отже для енергетичного близнюка цього приладу потрібно визначити декілька хронологічних послідовностей зміни стану, що є властивими для приладу в залежності від запланованого характеру його використання. Тобто, для більш ефективної оптимізації енергоспоживання в будівлі на основі цифрових близнюків електроприладів потрібний попередній графік, сформований людиною або інтелектуальною системою, в якому, окрім зазначення бажаного інтервалу часу користування приладом, потрібно, як варіант, у нечіткій лінгвістичні формі уточнити побутову роботу, що пов'язана з цим приладом (наприклад, прання великого об'єму білизни, або готування однієї порції певного блюда тощо). В цифровому двійнику приладу цій уточненій побутовій роботі буде відповідати певна хронологічна послідовність зміни його станів. Тож, це дозволить більш точно моделювати та прогнозувати роботу електроприладу з позиції споживання електроенергії.

Цифрові двійники пропонується створювати на основі графів переходів, в яких вершиною є певний стан приладу. Умовами переходу є настання події зміни режиму роботи приладу, яка визначається на основі статистичних характеристик, що визначені за підсумком аналізу історії використання приладу. При цьому в залежності від декількох сценаріїв роботи приладу з точки зору хронології зміни станів, з однієї вершини можуть бути декілька переходів, й за кожним з них визначається вірогідність настання відповідної умови. За умови перебування в певній вершині дією відповідного переходу у вигляді зациклення є генерування за певними статистичними характеристиками споживаної приладом потужності як випадкової величини, що змінюється у вузькому діапазоні значень з певними періодом та шпаруватістю. Граф, як і статистичні характеристики, закладені в нього, в процесі використання електроприладу постійно уточняються та доповнюються новими вершинами та переходами.

Розпізнавання типу електроприладу буде відбуватись на основі співставлення фактичних закономірностей зміни у часі параметрів імпульсного сигналу з шаблонними, що згенеровані в цифровому двійнику.

За умови побудови цифрового двійника розпізнавати перехід від одного стану приладу до іншого пропонується через різку зміну значень класифікаційних ознак. Якщо комбінація нових інформаційних ознак є новою –

створюється нова вершина графу. Далі на основі визначених цифрових двійників електроприладів, а також з врахуванням заданого користувачем бажаного графіку використання приладів відбувається оптимізація часового графіку використання електроприладів за критерієм мінімальних витрат коштів на електроенергію з урахуванням двозонного тарифу та виділеного ліміту потужності на вході в квартиру. За підсумком оптимізації маємо рекомендацію користувачу у вигляді графіку використання приладів, який забезпечує мінімальні витрати за споживану електроенергію.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід щодо створення системи підтримки прийняття рішень при керуванні енергоспоживанням електроприладів в будівлі на основі побудови їх цифрових двійників, які дозволять прогнозувати споживання потужності приладами. На основі прогнозованої інформації про електроспоживання приладів та з урахуванням побажань користувачів система проводить оптимізацію графіку використання приладів за критерієм мінімальних витрат на електроенергію. За підсумком цієї оптимізації користувачу буде наданий рекомендований графік використання електроприладів для планування роботи в будівлі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. European Commission. (2023, 20 вересня). New Energy Efficiency Directive published (Directive (EU) 2023/1791). https://energy.ec.europa.eu/news/new-energy-efficiency-directive-published-2023-09-20_en
2. European Commission. (n.d.). Energy Efficiency Directive – topics: energy efficiency targets, directive and rules (Directive (EU) 2023/1791). https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
3. International Organization for Standardization. (2024, February). ISO 50001:2018/Amd 1:2024 — Energy management systems — Requirements with guidance for use — Amendment 1: Climate action changes. https://www.iso.org/standard/88430.html
4. Renucci, D. (2024). Online non-intrusive load monitoring: A review. Energy Research & Social Science. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427124000792
5. International Energy Agency. (2024, December 13). Empowering Ukraine through a decentralised electricity system. Paris: IEA. https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system
6. P. Ponraj and S. Murugesan, "A Bi-level Decision Support System for Home Energy Management in Smart Homes," 2024 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Mangalore, India, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/PEDES61459.2024.10961886.
7. Dede, Georgia & Filiopoulou, Evangelia & Chatzithanasis, Georgios & Michalakelis, Christos & Thomas, Kamalakis. (2021). Evaluation of end user requirements for Smart Home applications and services based on a decision support system. Internet of Things. 16. 100431. 10.1016/j.iot.2021.100431
8. Vinasco, J. L. (2022). Decision support tools for smart Home Energy Management Systems (HEMSs). Technical University of Denmark

УДК 681.5:628.477

Н.С. Прядко[1], С.Є. Зубенко[2]
[1]Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПІДХІД ЩОДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПЕРЕРОБКОЮ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ ВЕРМИКУЛЬТИВУВАННЯ

Анотація. Розглянутий підхід щодо побудови спеціальної конструкції для міні-вермиферми, що дозволяє відстежувати зміну ваги контейнерів з органічними відходами та гумусом. Визначені завдання для створення системи керування міні-вермифермою, обґрунтовані етапи й інструменти для її дослідження, а також сформовані прогнозовані наукові й практичні результати.

Ключові слова: *керування переробкою органічних відходів, розумна ферма, класифікація процесів вермикультивування*

Вступ. Раціональне поводження з органічними відходами є однією з найактуальніших екологічних та економічних проблем сучасної України. Щороку утворюються мільйони тон побутових, аграрних і харчових відходів, більшість з яких потрапляє на полігони або спалюється, спричиняючи забруднення ґрунтів, води та атмосфери. У контексті європейської інтеграції України та впровадження принципів циркулярної економіки особливого значення набувають технології біоконверсії, що дозволяють перетворювати відходи на корисний продукт – органічне добриво [1]. Огляд використання технологій органічного компостування та вермикомпостування в світі підтверджує зростаючу актуальність цих напрямків. Наприклад, дослідження в [2] підкреслюють, що ці технології є ключовими біотехнологічними рішеннями для сталого керування органічними відходами.

Для України впровадження таких технологій відкриває можливості створення замкнених екотехнологічних циклів у сільському господарстві, комунальному господарстві та харчовій промисловості, сприяє зменшенню обсягів захоронення відходів, виробництву біогумусу та збереженню родючості ґрунтів. Це повністю відповідає стратегічним напрямам національної політики у сфері управління відходами, зокрема програмі WM4U – Waste Management for Ukraine (2024–2027) щодо трансформації системи поводження з муніципальними відходами для відповідності стандартам ЄС [3].

Вермикультивування, тобто переробка відходів із використанням дощових черв’яків (наприклад, Eisenia fetida), є екологічно безпечною, енергоощадною та технологічно гнучкою альтернативою традиційним методам утилізації. Однак, процес має біотехнологічну складність: параметри вологості, температури, кислотності, аерації та дозування субстрату потребують постійного моніторингу й регулювання. Тому розробка системи автоматичного керування вермифермою стає критичною для забезпечення стабільності процесу, підвищення продуктивності вермиферми та мінімізації людського фактору.

Постановка завдання. На основі аналізу існуючих рішень щодо керування процесом переробки органічних відходів з використанням вермикультивування запропонувати підхід щодо побудови систем автоматичного керування цим процесом, сформувати завдання досліджень, описати прогнозовані наукові й практичні результати.

Основний зміст роботи. Аналіз сучасних рішень за цією тематикою показав існуючі наразі слабкі сторони й недоліки автоматизації процесу переробки органічних відходів на основі вермикультивування. Зокрема, описана в статті [4] система керування лише підтримує задані людиною уставки щодо середовища для черв'яків. Тобто, завдання повної автоматизації процесу вермикультивування не вирішене – вермиферма потребує людської участі у вигляді стеження за процесом формування гумусу та за комфортністю середовища для черв'яків. В статті [5] описується підхід щодо автоматизації вермиферми на основі прямого вимірювання параметрів середовища для черв'яків. Однак, окрім недоліків, що мають місце в [4], слід звернути увагу на складність та коштовність налаштування та обслуговування сенсорів для вимірювання параметрів субстрату через складне та агресивне середовище. В оглядові статті [6] зазначається про зростаючу тенденцію використання в процесах керування вермифермою сучасних інформаційних технологій та методів штучного інтелекту, коли від системи керування очікується не тільки відпрацювання заданих людиною команд, а розпізнавання різних складних ситуацій та прийняття складних рішень. Зазначається, що наразі здійснюється пошук інноваційних рішень в межах цієї тенденції.

Аналіз існуючих рішень показав про відсутність наукової теоретичної бази для повної автоматизації вермиферми. Хоча зараз вже існують роботи, що замінюють контейнери, завантажують органічні відходи й видаляють вермичай, існуючі системи автоматизації не здатні відстежувати процес перетворення відходів в гумус та активність черв'яків, яка вливає на продуктивність вермиферми та може суттєво змінюватись через несприятливі для черв'яків кліматичні умови та органічні відходи.

В межах пропонованого підходу щодо створення системи автоматичного керування вермифермою пропонується розпізнавати етапи процесу перероблення відходів в гумус та активність черв'яків через аналіз зміни у часі ваги кожного окремого контейнера вертикальної міні-вермиферми. Органічні відходи й гумус мають різні властивості щодо щільності та здатності поглинання вологи при поливі, через що можливо за зміною ваги контейнера відстежити його склад – на скільки відсотків він ще заповнений відходами, а скільки відсотків вже складає гумус. Це дозволить системі автоматизації визначити момент, коли потрібно ставити зверху новий контейнер з органічними відходами. Також потім система автоматизації, порівнюючи вагу контейнера зверху з відходами, та знизу з гумусом та черв'яками, зможе відстежити активність черв'яків – чи переповзають вони з нижнього контейнера в верхній. Отже, система зможе

відстежити, чи сприятливими є кліматичні умови для черв'яків, та чи підходять їм нові органічні відходи.

Конструкція такої міні-вермиферми передбачає каркас у формі прямокутного паралелепіпеду, який дозволяє по спеціальним направляючим переміщувати горизонтальні платформи. На цих платформах на давачі ваги встановлюються контейнери. Внизу контейнерів мають бути отвори. При цьому один контейнери підсовується під інший, щоб субстрат в ньому щільно контактував з нижньою поверхнею верхнього контейнера, але щоб верхній контейнер не спирався на нижній, а вся його вага приходилась на давачі тиску на горизонтальній платформі, на яку він встановлений.

В основу алгоритмів прийняття рішень системою керування будуть закладені експертні правила. Експертні правила автоматично формуються після проведення навчання системи людиною-експертом. Під час навчання системи людина експерт відстежує поведінку черв’яків, коригуючи температуру й кількість води для поливу. При цьому всі дії людини зберігаються. Також в динаміці ваг контейнерів відшукуються закономірності, що корелюються з реальними ситуаціями, на які людина реагувала. Саме на основі цих закономірностей система в майбутньому буде розпізнавати ситуації, на які реагувала людина-експерт, виконуючи ті чи інші дії.

В межах створення й дослідження системи автоматичного керування вермифермою за запропонованим підходом будуть отримані наступні наукові та практичні результати.

Прогнозовані наукові результати:

- закономірності зміни ваги контейнерів вертикальної вермиферми, що дозволяють класифікувати етапи процесу перетворення органічних відходів на гумус;
- закономірності зміни ваги контейнерів вертикальної вермиферми, що дозволяють класифікувати ступінь активності черв'яків;
- закономірності зміни ваги контейнерів вертикальної вермиферми, що дозволяють класифікувати ступінь вологості матеріалів в контейнерах.

Прогнозовані практичні результати:

- метод непрямого визначення ступеню вологості матеріалів в контейнерах;
- алгоритм коригування параметрів зовнішнього середовища для черв'яків з метою покращення їх активності;
- метод класифікації етапів перероблення органічних відходів на гумус;
- метод класифікації активності черв'яків.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід щодо створення системи автоматичного керування переробкою органічних відходів на основі вермикультивування, який дозволить перейти до безлюдної технології роботи вермиферми. Система керування вермифермою замість людини буде відстежувати активність черв’яків та процес перетворення відходів на гумус на основі аналізу зміни у часі ваг кожного контейнера з відходами та гумусом. За

підсумком цього аналізу система буде класифікувати процеси переробки відходів та відповідним чином коригувати параметри субстрату.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кабінет Міністрів України. (2017). Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року (Розпорядження № 820-р від 8 листопада 2017 р.). Київ: Кабінет Міністрів України. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80
2. Zubair, M., Zhao, L., & Hussain, S. (2024). Composting and vermicomposting for sustainable management of organic wastes: A review. Discover Environment, 3(1), 47. https://doi.org/10.1007/s44279-024-00147-7
3. SALAR International. (2024). WM4U – Waste Management for Ukraine (2024–2027). Swedish Association of Local Authorities and Regions. Retrieved from https://salarinternational.se/salar/whatwedo/allprojects/projects/wm4uwastemanagementforukraine20242027.78433.html
4. Barcelon, M.S., Orilla, A.A., Mahilum, J.A., & Adtoon, J.J. (2019). Automated Vermiculture Monitoring and Compost Segregating System using Microcontrollers. Proceedings of the 6th International Conference on Bioinformatics Research and Applications
5. Tomicic, I. (2022). IoT-Based Agricultural Compost Monitoring System: Prototype Development and Sensor Technology Evaluation. Compost Science & Utilization, 30(1–4), 1–14. https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2273845

УДК 681.518

О.В. Карапиш[1], О.В.Карпенко[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ У РЕЖИМІ АКТИВНОГО СПОЖИВАЧА

Анотація. Розглянутий підхід до автоматизації процесів моніторингу та прогнозування енергоспоживання у системах розумного будинку, що функціонують у режимі активного споживача. Запропоновано використання адаптивних моделей прогнозування на основі методів машинного навчання та інтелектуального аналізу даних для підвищення ефективності управління енергобалансом. Показано, що впровадження таких систем дозволяє мінімізувати витрати на електроенергію, оптимізувати роботу акумуляторних систем і забезпечити участь домогосподарств у стабілізації енергосистеми. Наукова новизна полягає у встановленні нових залежностей оптимального енергобалансу розумного будинку від поєднання часових, тарифних, кліматичних і поведінкових факторів.

Ключові слова: *активний споживач, розумний будинок, моніторинг енергоспоживання, прогнозування енергоспоживання, інтелектуальна система.*

Вступ. Сучасна енергетика зазнає стрімкої трансформації у напрямку децентралізації та цифровізації. Однією з ключових тенденцій є перехід до моделі активного споживача, який не лише споживає, але й генерує та зберігає електроенергію. Така парадигма формує нову роль домогосподарств у

енергетичній системі, роблячи їх елементами розподіленої генерації та учасниками ринку електроенергії. В Україні актуальність цього напряму обумовлена потребою у підвищенні енергоефективності, розвитку відновлюваних джерел енергії та реалізації європейських стандартів енергоменеджменту в умовах децентралізації енергоринку.

Наукова спільнота приділяє значну увагу питанням інтелектуального моніторингу та прогнозування енергоспоживання. Зокрема, дослідження [1, 2] демонструють ефективність використання методів машинного навчання для короткострокового прогнозування енергоспоживання. Однак більшість існуючих рішень орієнтовані на пасивних споживачів і не враховують складну динаміку енергопотоків у будинках із власною генерацією та акумулюванням.

Таким чином, актуальним є створення автоматизованої системи, здатної у режимі реального часу аналізувати енергетичні процеси, здійснювати точне прогнозування споживання та генерації, а також приймати оптимальні рішення щодо розподілу енергопотоків між споживачем, генератором, акумулятором і мережею.

Постановка завдання. Наукова проблема полягає у відсутності комплексного підходу до автоматизації процесу моніторингу та прогнозування енергоспоживання у розумних будинках, що функціонують у режимі активного споживача, з урахуванням множинних взаємопов'язаних технічних, економічних і поведінкових факторів.

Метою дослідження є розробка методів і засобів автоматизації процесу моніторингу та прогнозування енергоспоживання для забезпечення оптимального енергобалансу та підвищення економічної ефективності розумного будинку в режимі активного споживача.

Очікуваними результатами є створення нових методів автоматизованого моніторингу багатопараметричних енергетичних процесів, алгоритмів короткострокового та середньострокового прогнозування споживання й генерації електроенергії. Отримані результати дозволять зменшити витрати на електроенергію, підвищити рівень споживання власної електроенергії та забезпечити інтеграцію домогосподарств у гнучкі енергомережі.

Основний зміст роботи. Сучасні системи управління енергією в розумних будинках враховують інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), акумуляторів та електромобілів [3]. Зазвичай їх формулюють у вигляді моделей змішаного цілочисельного програмування (MILP) із метою мінімізації сумарних витрат на енергію. Наприклад, на основі розробленої моделі оптимізації розумного будинку, яка враховує добове планування усіх типів навантажень (статичних і гнучких), цикли заряд/розряд електромобіля та батарей, а також продаж і закупівлю електроенергії [1], можна виділити основні компоненти такої системи:

- планування навантаження, що відповідає за оптимальне розподілення енергоспоживання статичних та гнучких приладів у часі;

- управління накопиченням, що визначає кількість циклів заряджання/розряджання батарей та електромобілів;
- інтеграція ВДЕ, таких як сонячні та вітрові установки, для задоволення власних потреб чи накопичення енергії;
- обмін з мережею у виді продажу надлишків або купівлі енергії відповідно до цінового сигналу (тарифів).

Ці компоненти забезпечують мінімізацію витрат та ефективне балансування системи. При цьому використовується прогностична модель: у роботі [4] реалізовано короткострокові передбачення добових цін на електроенергію, сонячної і вітрової генерації за допомогою децимації навчальної послідовності шляхом видалення неправдоподібних даних методами рефлексивного навчання та «к – найближчів сусідів». Результати показали, що зміни у наявності відновлюваних джерел суттєво впливають на розподіл попиту та цикли заряджання накопичувачів.

Інтеграція таких джерел створює додаткові вимоги до систем управління: необхідно точно прогнозувати і споживання, і виробництво енергії для забезпечення стабільності мережі та ефективного використання накопичувачів.

Збір та аналіз масових даних з «розумних лічильників» та інших сенсорів стимулює застосування глибинного навчання для прогнозів енергоспоживання. Ці моделі здатні навчатися на великих об’ємах даних про споживання, погодні умови, поведінку користувачів тощо і виявляти складні патерни. Наприклад, гібридні системи, що поєднують машинне та глибинне навчання, використовують історичні дані для побудови точних прогнозів енергоспоживання у «розумних» будинках.

Енергетичні прогнози розрізняють за часовим горизонтом: короткострокові (до місяця), середньострокові (від місяця до року) та довгострокові (понад рік). Для короткострокових прогнозів часто застосовують рекурентні нейромережі (LSTM/RNN) або методи ARIMA, тоді як для середньо- та довгострокових – економетричні моделі чи трендові екстраполяції. Вибір методу залежить також від характеру даних та доступного набору ознак.

Глибині нейромережі мають багатошарову архітектуру і вчаться на різних ознаках даних. Рекурентні мережі з довгою пам’яттю (LSTM) дозволяють захоплювати тривалі часові залежності, а згорткові мережі (CNN) – виділяти складні просторові шаблони в даних. Спеціальні поєднання архітектур (наприклад, CNN-LSTM, LSTM-автокодувальники, тимчасові згорткові мережі) запропоновані для кращого моделювання складних часових рядів і зазвичай показують вищу точність прогнозу. Такі підходи дозволяють покращити якість передбачень пікових навантажень і більш гнучко реагувати на зміну режимів споживання.

Погодинне прогнозування генерації фотоелектричних електростанцій (ФЕС) за добу наперед є критичним для інтеграції відновлюваної енергії в енергомережі. Генерація ФЕС дуже залежить від погодних умов (сонячного випромінювання, хмарності тощо), які є мінливими і непередбачуваними. Як

відзначають Заславський і Карпенко у роботі [4], незважаючи на численні наявні алгоритми, немає універсально визнаного рішення для прогнозування виробітку ФЕС – створити математичну модель, яка точно відображає вплив усіх факторів, надзвичайно складно. Вони підкреслюють, що лише ретельне врахування кожного впливового фактору в прогнозній моделі може підвищити точність передбачення генерації сонячної енергії. Якість вихідних даних є критичною при навчанні прогностичних моделей. У дослідженнях [3, 4] проаналізовано проблему помилкових метеорологічних даних у навчальній послідовності при побудові моделі ФЕС. Навіть незначні неточності в історичних метеоданих призводять до того, що навчена модель інтерпретує реальні (правильні) погодні умови як помилкові прогнози генерації. Для подолання цієї проблеми розроблено ансамблевий підхід до навчання моделі, який дозволяє зменшити вплив похибок у вхідних прогнозах погоди на точність передбачення виробітку електроенергії. Це забезпечує стабільніші прогнози навіть за умови обмеженої надійності вихідних даних.

Використання наведених методів прогнозування та корекції даних у сумі дозволяє створювати ефективні системи управління енергією в розумних будинках і відновлюваних енергетичних установках, що відповідають сучасним викликам енергозбереження та стійкості енергосистеми.

Висновки. У роботі запропоновано комплексний підхід до автоматизації моніторингу та прогнозування енергоспоживання для активних споживачів. Також вказано про недоліки існуючих систем, які орієнтовані на пасивних споживачів і не враховують складність процесів генерації, акумулювання та двостороннього обміну енергією. Розроблено концепцію інтегрованої системи, що базується на математичному моделюванні енергетичних процесів та адаптивних моделях машинного навчання. Запропоновано використовувати метод децимації навчальної послідовності шляхом видалення неправдоподібних даних, метод рефлексивного навчання та метод «к – найближчів сусідів» для оптимізації точності прогностичних моделей. Впровадження запропонованого підходу дозволить, з одного боку, досягти значної економічної ефективності для домогосподарства та максимізувати використання енергії власного виробництва. З іншого боку, воно створює технологічну основу для участі активних споживачів у програмах управління попитом, перетворюючи їх з непередбачуваної загрози для стабільності мережі на керований та корисний актив у децентралізованій енергосистемі майбутнього.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sorknæs P., et al. "A Prosumer Model Based on Smart Home Energy Management and Forecasting Techniques" // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 1724.
2. Ghimire S., et al. "Intelligent deep learning techniques for energy consumption forecasting in smart buildings: a review" // Artificial Intelligence Review. – 2024. – Vol. 57, No. 3.
3. Alexandr Zaslavskiy and Oleh Karpenko, Prognostic Model of a Photovoltaic Power Plant, Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, Cham 2022. Vol. 344, pp. 91–103. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89902-8_7

4. Karpenko, O., Zaslavskiy, A., Tkachev, V. On the Issue of Reducing the Negative Impact of Erroneous Data in the Training Sequence of a Predictive Model. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, 2024. vol 1091, pp 367-376 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_27

УДК 662.215:66.017:681.5

Н.С. Прядко[1], О.В. Карпов[2]
[1]Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПІДХІД ЩОДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАРЯДУ З ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Розглянутий підхід щодо створення системи автоматичного керування процесом 3Д-друку для виготовлення заряду з високоенергетичних матеріалів. Визначені завдання для створення системи, обґрунтована ідея автоматичного керування процесом 3Д-друку за критеріями мінімальних питомих енерговитрат та максимальної продуктивності, а також сформовані прогнозовані наукові й практичні результати.

Ключові слова: *система автоматичного керування, 3Д-друк, високоенергетичні матеріали*

Вступ. Впровадження адитивного виробництва (3D-друку) у виробничі процеси з високоенергетичних матеріалів відкриває значні переваги: можливість створення складної геометрії, мінімізація матеріальних втрат, гнучкість виготовлення та скорочення часу циклів. Проте для того, щоб такі технології стали промислово-застосовними, зокрема для виготовлення зарядів, необхідна система автоматизації, яка забезпечує контроль геометрії, властивостей матеріалу, безпечної обробки, серійності та відтворюваності.

Дослідження показують, що автоматизація у 3D-друці вже стала ключовою для переходу від одиничних прототипів до серійного виробництва: використання робототехніки, інтелектуального програмного забезпечення, моніторингу та аналітики процесу дозволяє забезпечити стабільну якість, зменшити ручну працю та прискорити цикл виробництва [1].

Застосування адитивних методів для матеріалів із високою енергетичною щільністю (наприклад, композити чи суміші, що використовуються у зарядах) уже фіксується: дослідження з 3D-друку композицій із RDX показують технічну здійсненність та потенційні переваги [2].

Об’єднання автоматизації та адитивного виробництва дозволяє реалізувати «цифрову фабрику», коли весь процес від дизайну та підготовки матеріалу й до друку, пост-обробки й контролю якості здійснюється із мінімальним втручанням людини зі строгою системою контролю параметрів [3].

У контексті виготовлення зарядів з високоенергетичних матеріалів це набуває особливої значущості з кількох причин:

– високоенергетичні матеріали зі складними й нестандартними фізичними властивостями часто мають високу чутливість до геометрії, пористості, присадок; отже, високоточний контроль створення компонента є критичним;

– технологія адитивного виробництва дозволяє створювати внутрішню структуру виробу (канали, пористість) із контрольованими параметрами;

– автоматизація забезпечує відтворюваність, документування, цифровий слід (digital-thread) виробництва, що важливо для якості та стандартизації.

Таким чином, розробка підходу до системи автоматизації адитивного виробництва зарядів із високоенергетичних матеріалів є не лише технологічно інноваційною, але й критичною з точки зору забезпечення якості, безпеки, скорочення термінів і витрат. Актуальність теми визначається поєднанням трьох ключових трендів: автоматизація виробництва, адитивні технології і високоенергетичні матеріали.

Постановка завдання. На основі аналізу існуючих рішень щодо керування процесом 3Д-друку для виготовлення заряду з високоенергетичних матеріалів запропонувати підхід стосовно створення системи автоматичного керування 3Д принтером за критеріями мінімальних питомих енерговитрат та максимальної продуктивності без зменшення якості надрукованого заряду.

Основний зміст роботи. Наразі технологія 3Д друкування виробів з високоенергетичних матеріалів не є повністю розробленою, і дослідження в цьому напрямі продовжуються.

Зокрема, в оглядовій статті [4] зазначено, що дослідження в цьому напрямі відбуваються одразу за декількома векторами – від пошуку матеріалів для більш якісного друкування твердих палив до покращення технології друку та конструктивних параметрів принтеру, у тому числі з позиції автоматичного керування даним процесом. Також зазначено, що завдання 3Д-друкування виробів на основі високоенергетичних матеріалів остаточно ще не вирішено. Звернено увагу, що одним з перспективних напрямів дослідження в цій сфері є розробка друкарського обладнання, що підтримує сумісність з одночасним друком різних типів вибухових рецептур, у тому числі за рахунок інтелектуалізації автоматичного керування процесом друку.

В роботі [5] розглянутий приклад вирішення завдання підвищення якості 3Д друку з високоенергетичного матеріалу за рахунок пошуку оптимального за властивостями матеріалу для друку на основі технології адитивного виробництва FDM. При цьому були визначені вимоги щодо автоматичного керування принтером за цією технологією, а саме забезпечення суворого контролю температури під час процесу друку, оскільки надмірне нагрівання може призвести до деградації або передчасних реакцій енергетичних матеріалів. Крім того, оптимізація геометрії сопла відіграє вирішальну роль у точності нанесення шарів. Як недолік можна відзначити відсутність дослідження залежності якісних

критеріїв друку від режимів роботи принтера (параметри режиму роботи принтера були підібрані експериментальним шляхом та не змінювались).

З урахуванням недоліків в існуючих рішеннях щодо автоматизації процесу 3Д друку з високоенергетичного матеріалу запропонована така ідея стосовно керування 3Д принтером, в якому у якості механізму подачі матеріалу використовується екструдер.

Є гранична швидкість руху поршня екструдера, при перевищенні якої через обмеження прохідної здатності трубок після поршня починає суттєво збільшуватись опір переміщенню матеріалу та, відповідно, тиск в циліндрі за умови майже повної відсутності збільшення швидкості руху матеріалу. Саме це значення швидкості руху поршня є оптимальним за критеріями витрат енергоресурсів на друк та продуктивності принтеру. Для кожного складу матеріалу та діаметру трубок й сопла (залежить від параметрів друкованої деталі) це значення змінюється. Тому цю оптимальну швидкість переміщення поршня необхідно визначити для всіх сполучень властивості матеріалу та конструктивних параметрів принтеру, як і оптимальне відношення цієї швидкості до швидкості обертання столу, яке дає найкращу якість нанесеного шару. Далі необхідно сформувати базу знань на основі статичної залежності тиску в поршневій порожнині циліндру від швидкості руху поршня. Як показали результати експериментів, для конкретних діаметру сопла та концентрації матеріалу ця залежність буде іншою. Тому система буде починати роботу з пониженої швидкості руху поршня, коли матеріал заповнює трубки. Цього часу достатньо, щоб для поточних умов отримати робочу точку в системі координат з вище згаданими залежностями, вимірюючи тиск та швидкість поршню. Далі аналізується, до якої кривої точка є найближчою, та за цією кривою визначається концентрація матеріалу. Діаметр сопла вже введений в систему. Таким чином, після цього етапу ідентифікації властивості матеріалу система за допомогою бази знань вже знає, яку задати швидкість поршня та столу за критеріями максимальної продуктивності та мінімальних витрат ресурсів на друк.

За умови реалізації запропонованого підходу щодо створення системи автоматичного керування 3Д принтером будуть отримані наступні наукові й практичні результати.

Прогнозовані наукові результати:

– статичні залежності тиску в поршневій порожнині циліндра екструдера від швидкості руху його поршня, що дозволяють системі керування ідентифікувати властивості високоенергетичного матеріалу;

– залежності оптимальної за критеріями максимальної продуктивності та мінімальних питомих енерговитрат на друк швидкості переміщення поршня від параметрів високоенергетичного матеріалу, що дозволяють системі керування визначити оптимальну швидкість руху поршня;

– залежності оптимальної за критерієм якості друку швидкості обертання столу від швидкості руху поршня, що дозволяють системі керування визначити оптимальну швидкість обертання столу;

– залежності оптимальної за критерієм якості друку температури в камері принтеру від параметрів високоенергетичного матеріалу, що дозволяють системі керування визначити оптимальну температуру для підсушування матеріалу.

Прогнозовані практичні результати:

– метод ідентифікації властивостей високоенергетичного матеріалу при 3Д-друкуванні;

– алгоритм керування швидкостями руху поршня екструдера та обертання столу принтера на основі ідентифікації властивостей високоенергетичного матеріалу;

– алгоритм керування температурою в камері принтера на основі ідентифікації властивостей високоенергетичного матеріалу.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід щодо створення системи автоматичного керування 3Д принтером за умови використання екструдера як механізму подачі високоенергетичного матеріалу. Система непрямим способом на основі аналізу тиску в поршневій порожнині циліндру та швидкості руху поршня визначає оптимальні параметри роботи принтеру за критеріями мінімальних питомих енерговитрат та максимальної продуктивності без зменшення якості надрукованого заряду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kantaros, A. (2025). The role of 3D printing in advancing automated additive manufacturing. MDPI Proceedings, 6(2), 21. https://www.mdpi.com/2673-4052/6/2/21
2. Zhang, J., et al. (2025). Efficient 3D printing of RDX composites with high relative density. ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386125002873
3. Sinterit. (2025). Automation in 3D printing: smarter & faster manufacturing. Sinterit 3D Printing Guide. https://sinterit.com/3d-printing-guide/future-of-3d-printing/automation-3d-printing/
4. Bojun Tan, Jinkang Dou, Yujia Wen, Binghui Duan, Hongchang Mo, Zongliang Wei, Jing Zhang, Yongfei Pan, Xiaoyong Ding, Ning Liu, 3D Printing for Explosives and Propellants Applications, Additive Manufacturing Frontiers, Volume 3, Issue 3, 2024, 200151, ISSN 2950-4317, https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200151.
5. Marin Alexandru, Ovidiu George Iorga, Gabriela Toader, Cristiana Epure, Mihail Munteanu, Adrian Nicolae Rotariu, Marius Marmureanu, Gabriel Flavius Noja, Aurel Diacon, Tudor Viorel Tiganescu, Florin Marian Dirloman, FDM - 3D printing of thermoplastic composites with high energetic solids content designed for gun propellants, Defence Technology, Volume 49, 2025, Pages 165-179, ISSN 2214-9147, https://doi.org/10.1016/j.dt.2025.02.024.

УДК 681.5:004.94:697.9

О.В. Карпенко[1], К.В. Козачук[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ОПАЛЕННЯМ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМ ПРИМІЩЕННЯМ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

Анотація. Розглянутий підхід щодо автоматизації процесу керування опаленням багатофункціональним приміщенням на основі класифікації кліматичних умов, що дозволяє створити комфортні індивідуальні кліматичні умови для користувача, при цьому зберігаючи баланс із економією електроенергії. Визначені завдання для створення системи керування опалення багатофункціональним приміщенням, обґрунтовані етапи й інструменти для її дослідження, а також сформовані прогнозовані наукові й практичні результати.

Ключові слова: *ML, DL, машинне навчання, глибоке навчання, розумний будинок, класифікація кліматичних умов.*

Вступ. Актуальність автоматизації процесу керування опаленням багатофункціональним приміщенням на основі класифікації кліматичних умов пояснюється необхідністю підвищення енергоефективності будівлі. Близько 40% енергетичних ресурсів використовується на забезпечення нормативних та санітарно-гігієнічних умов у приміщенні.[1, 2] При цьому необхідно досягти максимальної енергоефективності при забезпеченні комфорту користувачів.

Стратегії керування на основі штучного інтелекту можуть зменшити споживання енергії до 40% шляхом динамічної адаптації до умов навколишнього середовища та рівня заповненості [3]. Водночас при доволі високому потенціалі економії енергії при використанні адаптивних САК, стало очевидним, що всі існуючі системи автоматичного керування не в змозі забезпечити оптимальне керування багатофункціональними просторами, які потребують врахування складної взаємодії між зовнішніми кліматичними умовами, тепловиділення від людей та обладнання теплової інерції будівлі, а також завантаженості різних зон.

Постановка завдання. Необхідно розробити нові методи та засоби автоматизації процесу керування опаленням багатофункціональним приміщенням на основі класифікації кліматичних умов для забезпечення оптимального балансу між енергоефективністю та індивідуальними вподобаннями користувачів.

Основний зміст роботи. Тематика використання алгоритмів ML та DL для прогнозування оптимальної температури приміщення із подальшим керуванням системою опалення є вкрай обширною. Розглянемо деякі приклади.

У [4] пропонуються новітні метод машинного навчання для прогнозування внутрішньої температури повітря розумного приміщення. Суть полягає у використанні сурогатної моделі на основі мереж з перехресною перевіркою положення вікна та оптимізованими алгоритмами вибірки даних. Сам метод був

спеціально розроблений як сурогатна модель для здешевлення її створення водночас зберігаючи масштабованість та роблячи її легкою для імплементації. Проте метод прогнозування не пропонує класифікації кліматичних умов, що могло б покращити її показники. Також немає досліджень технічної реалізації використання прогнозів у системі керування.

Стаття [5] пропонує створення моделі довгострокової пам'яті на основі уваги, що адаптована для середовищ інтелектуальних будівель. Для тестування цієї моделі був створений цифровий двійник будівлі. Крім того, цифровий двійник дозволяє симулювати наповненість людьми приміщення. Також, присутня класифікація кліматичних умов на три категорії за стандартом ASHRAE 55: некомфортно холодно, нейтрально та некомфортно тепло. Недолік – недостатність проведення тестування на реальних об’єктах.

У [6] пропонується розробити рекомендаційну систему керування опаленням на основі графових мереж уваги та ансамблевого навчання з укладанням. В імплементації вдалося добитися скорочення енерговитрат на 15%, проте рішення є доволі дорогим і технічно складним. Також відсутня класифікація кліматичних умов.

Основною відмінною рисою статті [7] є те що окрім використання алгоритмів ML та DL для забезпечення цілісності та прозорості даних використана технологія блокчейну. Рішення є цікавим, проте більш адаптоване для систем розумного міста, ніж розумного будинку. Тобто, не “заточене” під індивідуальні комфортні кліматичні умови користувача. Як і в усіх інших рішеннях вище, за виключенням [5], не запропонована класифікація кліматичних умов, що могло б покращити показники системи.

На основі існуючих рішень пропонується наступний підхід щодо автоматичного керування опаленням багатофункціональних приміщень на основі класифікації кліматичних умов.

Отже, пропонується створити цифрового близнюка приміщення із симуляцією теплової динаміки для забезпечення економії ресурсів та комфортності для людини. Використати для цього планується лабораторію для дослідження процесу опалення приміщення.

Створення цифрового близнюка клімату в приміщенні націлене на визначення комфортності перебування людини в приміщенні за певних кліматичних умов (забезпечення економії ресурсів та комфортності для людини). Це дозволить розробити один з багатьох елементів цифрового близнюка людини в розумному будинку. Стан людини за пасивним спостеріганням можна визначати на основі аналізу дії людини за певних умов (людина підвищила температуру, чи одягла светр тощо).

Пропонується розбити кімнату на зони, та у кожну з них помістити давачі температури, вологості, концентрації вуглекислого газу, визначення присутності людини. За допомогою накопичення історичних даних та алгоритмів машинного та глибокого навчання натренувати модель для прогнозування індивідуальних уподобань користувача у зоні. На основі цих уподобань можна подібно до [5]

розподілити кліматичні умови за класифікацією. На основі цієї класифікації система може задавати відповідний керуючий вплив на нагрівачі у зоні збільшуючи чи зменшуючи тепловиділення.

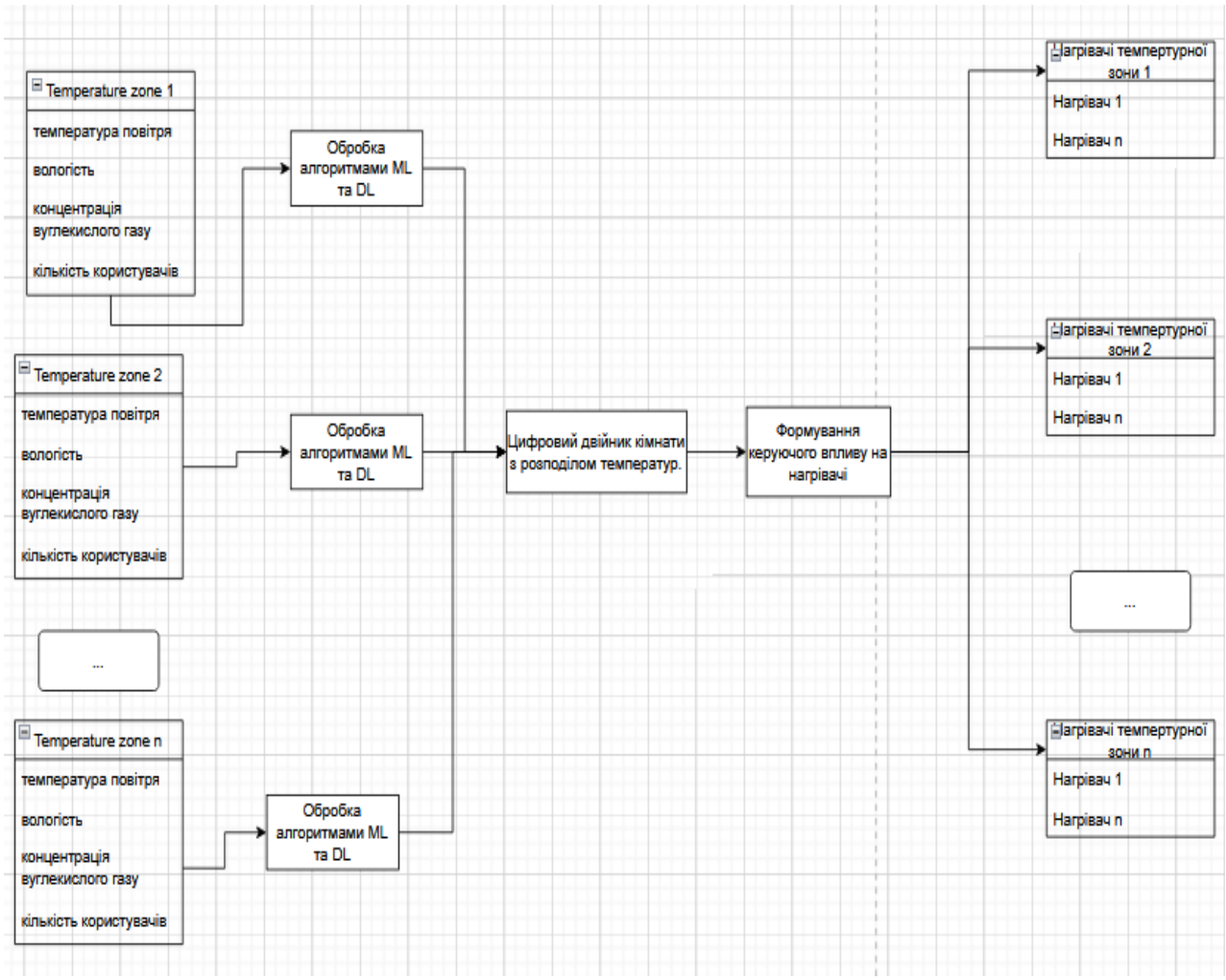


Рис. 1. Схема автоматизації процесу керування опаленням багатофункціональним приміщенням на основі класифікації кліматичних умов

Науковою новизною є отримання нових залежностей оптимальних параметрів опалення від комбінації факторів у часі та просторі (класів кліматичних умов, типів функціонального призначення зон приміщення, патернів використання системи опалення, характеристик теплової інерції будівлі), які є відображенням теплофізичних процесів, що протікають у багатофункціональному приміщенні при динамічній зміні режимів експлуатації.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід щодо автоматизації процесу керування опаленням багатофункціонального приміщення на основі класифікації кліматичних умов. Система керування може спиратися на прогноз кліматичних умов створений за допомогою алгоритмів ML та DL. Цей прогноз можна класифікувати, й на його основі створювати керуючий вплив на нагрівачі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Delgado-Prieto M., et al. "Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings" // Environmental Data Science. – 2024. – Vol. 3. – Article e1. (Cambridge University Press, Scopus).
2. Базовий рівень споживання енергії громадськими будівлями. Роль базового рівня при проведенні енергетичної оцінки будівель та застосуванні механізму ЕСКО [Електронний ресурс] – Режим доступу доресурсу: http://surl.li/eakvb.
3. Aghili, S. A., A. Haji Mohammad Rezaei, M. Tafazzoli, M. Khanzadi, and M. Rahbar. 2025. "Artificial Intelligence Approaches to Energy Management in HVAC Systems: A Systematic Review." Buildings (2075-5309) 15 (7): 1008. https://doi.org/10.3390/buildings15071008.
4. Caro R., et al. "Innovative machine learning approaches for indoor air temperature forecasting in smart infrastructure" // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 585. (Nature, Scopus).
5. Ghaffar M., et al. "Digital twin based deep learning framework for personalized thermal comfort prediction and energy efficient operation in smart buildings" // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 1446. (Nature, Scopus).
6. Wang Y., et al. "Enhancing Intelligent HVAC optimization with graph attention networks and stacking ensemble learning, a recommender system approach" // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 3558. (Nature, Scopus).
7. Rahman A., et al. "AI powered blockchain framework for predictive temperature control in smart homes using wireless sensor networks" // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Article 18645. (Nature, Scopus).

УДК 22.271:621.865.8:681.5

А.В. Бубліков[1], Б.Ш. Продан[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ СКРЕБКОВИМ КОНВЕЄРОМ У ВИБОЇ ПРИ ПІДЗЕМНОМУ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ

Анотація. Розглянутий підхід щодо створення системи автоматичного керування вантажопотоком в вибої шахти. Визначені завдання для створення системи, обґрунтована ідея автоматичного керування вантажопотоком без його прямого вимірювання, а також сформовані прогнозовані наукові й практичні результати.

Ключові слова: *система автоматичного керування скребковим конвеєром, транспортування вугілля у вибої, керування вантажопотоком конвеєра*

Вступ. В умовах підземного видобутку вугілля на транспортну систему (в тому числі скребковий конвеєр) припадає значна частка споживання електроенергії. Питомі енерговитрати на транспортування матеріалу безпосередньо залежать від співвідношення навантаження (вантажопотоку) і швидкості тягового органу. Якщо конвеєр працює на повній швидкості при неповному завантаженні, виникає суттєве збільшення питомих енерговитрат: висока швидкість тягового органу з одночасно низькою корисною

продуктивністю конвеєра призводить до збільшення ваги нераціональних витрат електроенергії, які пов'язані з рухом тягового органу, тертям, втратами в приводі та механічних передачах. Наприклад, у дослідженні для скребкових конвеєрів показано, що понад 50 % часу двигун працює з недовантаженням більш ніж на 40 % [1].

Сучасні дослідження в галузі стрічкових конвеєрів (які за принципом близькі до тягових систем у виробках) демонструють, що зменшення швидкості руху при зниженому вантажопотоці призводить до значного скорочення енергоспоживання: наприклад, методика з плаваючою швидкістю забезпечила помітне зниження витрат [2].

Для підземних умов, коли вантажопотік може змінюватися в режимі доби або змін (чергування комбайна, кріплення тощо), адаптивне керування швидкістю скребкового конвеєра дозволяє синхронізувати роботу транспортної ланки з реальною продуктивністю лави, скоротивши час роботи механізму з надлишковою швидкістю та без відповідного навантаження. Також це знижує механічні навантаження на ланцюги, приводні системи та кріпильні елементи, що продовжує ресурс і зменшує витрати на експлуатацію [3].

Враховуючи, що енерговитрати на транспортні системи в гірничому видобутку можуть становити значну частку від загальних витрат на електроенергію – оптимізація швидкості тягового органу за вантажопотоком має прямий вплив на витрати, екологічність та енергоефективність виробництва.

Постановка завдання. На основі аналізу існуючих рішень щодо керування процесом транспортування вугілля в вибої шахти запропонувати підхід стосовно створення системи автоматизації процесу керування скребковим конвеєром за критерієм мінімальних питомих енерговитрат.

Основний зміст роботи. Недоліком існуючих рішень [1, 4-5] є те, що всі вони в алгоритмі керування швидкістю тягового органу конвеєра використовують прогностичної моделі без зворотного зв'язку за фактичними параметрами процесу транспортування вугілля у вибої. При цьому для тонких вугільних пластів виникає досить значна похибка прогнозування через складний характер впливу зовнішнього середовища на конвеєр як об'єкт автоматизації в умовах вибою, а також неврахування особливого характеру завантаження вугілля на конвеєр в умовах обмеженої завантажувальної продуктивності виконавчих органів комбайна.

Тому, з урахуванням цього недоліку, запропонована ідея керування конвеєрним транспортом з урахуванням особливостей видобутку вугілля на тонких пластах, що полягають в кардинальній відмінності процесу завантаження вугілля на забійний конвеєр через сильно обмежений простір. При цьому керування швидкістю тягових органів реалізується в функції двох інформаційних ознак.

Першою є розрахункова вага вугілля на конвеєрі, яка визначається на основі інформації про фактичні режими роботи гірничих машин на попередній транспортній ланці (швидкість подачі комбайна, швидкості обертання його

виконавчих органів, потужності двигунів його приводів різання, швидкість руху скребкового тягового органу), а також на основі модифікованої моделі завантаження вугілля шнековим виконавчим органом малого діаметру.

На відміну від інших рішень, на тонких пластах Донецького басейну є не дві точки інтенсивного входу вугілля, що прив'язані до виконавчих органів комбайна, а дві точки, що суттєво рознесені в просторі. Перша – це передній виконавчий орган комбайна. А друга – це завантаження вугілля лемехом при притисканні конвеєра до груді забою та ручна зачистка за комбайном. Тому й тактика керування швидкістю тяговим органом буде іншою – потрібно залишати резерв для другої точки.

Другою інформаційною ознакою є потужність двигунів забійного конвеєра.

При цьому пропонується впровадити відстеження системою керування порушення характеру статичної залежності потужності двигуна приводу конвеєра від його загальної розрахункової завантаженості з усередненням цих параметрів на різних інтервалах часу. Значне сповільнення збільшення потужності за умови збільшення завантаженості конвеєра буде сигналом про перевищення обмеження щодо кількості вугілля на певній локальній ділянці тягового органу (наприклад, між скребками). Тобто, йдеться про досягнення обмеження за транспортувальною здатністю конвеєра. Керування конвеєром на межі цього обмеження відповідає його роботі з мінімальними питомими енерговитратами на транспортування вугілля.

В ході досліджень для реалізації запропонованого підходу щодо створення системи автоматизації процесу керування скребковим конвеєром будуть отримані такі наукові та практичні результати:

Прогнозовані наукові результати:

- статичні залежності потужності двигуна приводу конвеєра від його розрахункової загальної завантаженості, що дозволяють системі керування ідентифікувати режим роботи конвеєра на межі його транспортувальної здатності, що відповідає мінімальним питомим енерговитратам на транспортування вугілля;
- закономірності зміни у часі потужності двигуна приводу різання верхнього виконавчого органу, що дозволяють визначити непрямим шляхом кількість вугілля, яке зруйноване верхнім виконавчим органом;
- закономірності зміни в часі високочастотної складової потужності двигуна приводу конвеєра, яка через тертя й демпфування вугіллям коливань тягового органу змінює свою вагу, що дозволяє визначати загальну завантаженість конвеєра непрямим шляхом.

Прогнозовані практичні результати:

- методика визначення непрямим шляхом загального завантаження скребкового конвеєра в умовах тонких вугільних пластів;
- алгоритм керування швидкостями руху тягових органів конвеєрів в функції загальної завантаженості конвеєра;

- модифікована модель завантаження вугілля на забійний конвеєр в умовах тонких вугільних пластів;

- комплексна модель транспортування вугілля в вибої для тонких вугільних пластів.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід щодо створення системи автоматизації процесу керування скребковим конвеєром на основі непрямого визначення вантажопотоку та відстеження кореляції між розрахунковим завантаженням конвеєра та активною потужністю, що споживає електродвигун привода конвеєра. Цей підхід дозволить системі керування балансувати між недовантаженим та перевантаженим станами конвеєра, забезпечуючи таким чином мінімальні питомі енерговитрати на транспортування вугілля у вибої.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zhang, X., Ren, M., Wang, H., Xu, H., Shi, B., & Gao, M. (2025). A Study on a Speed Regulation Method for Mining Scraper Conveyors and a Control Strategy for Permanent Magnet Drive Systems. Machines, 14(3), 106. https://www.mdpi.com/2076-0825/14/3/106
2. Ji, J., Miao, C., & Li, X. (2020). Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. PLOS ONE, 15(1), e0227992. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227992
3. Suchoń, J., Tytko, S., & Mendyka, P. (2017). Armoured face conveyor's smooth velocity control for increased durability. Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering, 3(531)(3), 21-29. https://www.researchgate.net/publication/325731443_Armored_face_conveyor%27s_smooth_velocity_control_for_increased_durability
4. Yuan, Y., Qu, W., Zhou, L., Zhang, A., Bai, Y., & Wang, M. (2025). Energy-saving speed control of mining belt conveyor based on second-order linear self-immunity. AIP Advances, 15(7), 075317.
5. Zhang, D., Qin, J., Wu, W. et al. Research on scraper conveyor load prediction method based on wavelet transform and BP neural network. Sci Rep 15, 15367 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-00333-7

УДК 62-50:697.3

Н.С. Прядко[1], О.В. Репич[2]
[1]Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПІДХІД ЩОДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ ВОДЯНИХ АКУМУЛЯТОРІВ В БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДИНКАХ

Анотація. Розглянутий підхід щодо побудови автономної системи накопичення води й тепла в багатоповерхових будівлях, що дозволяє гнучко керувати запасами ресурсів. Визначені завдання для створення системи керування акумулюванням води й тепла, обґрунтовані етапи й інструменти для її дослідження, а також сформовані прогнозовані наукові й практичні результати.

Ключові слова: *керування накопиченням тепла й води в будівлі, розумний будинок, оптимізація процесів споживання ресурсів в будівлі*

Вступ. Актуальність розробки технологій «розумного будинку» для акумулювання тепла й води зумовлена одночасно потребою декарбонізації та підвищенням стійкості житла. У будівлях зростає споживання енергії, тож інтеграція систем теплового акумулювання дає змогу зміщувати в часі навантаження, зменшувати піковий попит і, відповідно, викиди CO_2, особливо за умови керування попитом у мережі «smart grid» [1].

Для України наразі в умовах періодичного вимикання електроенергії питання “стійкості” будівлі є надзвичайно актуальним. Взаємна інтеграція систем резервного живлення та систем накопичення води й тепла дозволить вирішити питання опалення приміщень та наявності води за умови періодичних відключень будівлі від енерго- та водопостачання.

Також слід зазначити, що керування процесами розподілу й споживання ресурсів у будівлях з поєднанням методів штучного інтелекту та системи «smart house» – це один з найбільш дієвих способів забезпечення раціонального споживання ресурсів в будівлі. Це є особливо актуальним в наш час, коли, з оглядом на негативні кліматичні наслідки нераціонального використання людством ресурсів в минулому, одним з основних критеріїв ефективності будь якого технічного або технологічного рішення є енергоефективність та мінімізація впливу на зовнішнє середовище. Прикладом є технологія Nearly Zero-Energy Buildings (NZEBs) – концепція будівництва, за якої будівля має надзвичайно низьке споживання енергії [2].

Постановка завдання. На основі аналізу існуючих рішень щодо керування процесами акумулювання тепла й води в будівлях запропонувати підхід щодо побудови систем автоматичного керування цими процесами, сформувати завдання досліджень, описати прогнозовані наукові й практичні результати.

Основний зміст роботи. Тематика автоматичного керування акумулюванням води й тепла з оглядом на її популярність є досить поширеною. Зробимо огляд декількох запропонованих рішень цього завдання.

В статті [3] представлений сучасний підхід щодо проектування систем керування опаленням та охолодженням приміщень в будівлях з системами накопичення тепла й холоду. В межах цього підходу закладається змінність стратегій керування процесом накопичення тепла в залежності від умов та місця застосування системи. Недоліком є відсутність механізму адаптації системи до людини на основі моделі її поведінки, що призводить до зменшення ступеню енергоефективності через людський фактор (прогнозування добових витрат теплової енергії).

В статті [4] наведений приклад використання в алгоритмах керування накопиченням тепла методів штучного інтелекту для прогнозування кількості генерування тепла з використанням сонячної енергії, а також для взаємодії системи з людиною. Наводиться приклад непрямого вимірювання температури води в теплових водяних акумуляторах. Недолік такий самий, як і в джерелі [3].

В статті [5] при плануванні накопичення теплової енергії враховуються тариф, бажання користувачів з позиції комфортності та характеристики акумуляторів. Але, при цьому немає прогнозування витрат електроенергії та ресурсів (ліміт попиту стосується тільки споживаної потужності в електромережі) для того, щоб не накопичувати зайві тепло й воду в умовах обмеженої дешевої електроенергії. Також, немає узгодження процесу накопичення тепла з графіком споживання тепла. Окрім цього, не вирішується завдання оптимізації накопичення води. Ще одним недоліком є необхідність введення користувачем комфортних для нього значень температур, що зменшує рівень енергоефективності через появу людського фактору.

На основі огляду існуючих рішень за проблематикою керування процесом накопичення тепла й води та з урахуванням їх недоліків запропонований наступний підхід щодо побудови систем акумулювання води й тепла в багатоповерхових будівлях та створення систем керування цими процесами.

Акумулятори встановлюються на кожному поверсі будівлі, одні з них є накопичувачами води, інші – теплової енергії, яка може бути використана або для підігріву води для споживання, або для опалення. Відбір теплової енергії відбувається без прямого контакту з теплоносієм в акумуляторах. Через відмінності функціонування систем водопостачання та систем опалення, одні з теплових акумуляторів пропонується використовувати з метою накопичення тепла саме для опалення, а інші – для підігріву води. До теплових акумуляторів почергово можна підключати контури опалення або водопровідні труби різних квартир. З акумуляторів води воду можна підкачувати на верхні поверхи.

Таким чином, ми маємо складну розгалужену систему накопичення води й тепла з декілька десятків баків (кілька одиниць баків на кожному поверсі в залежності від кількості квартир). Ця система має великий ступінь гнучкості з точки зору реалізації різних тактик накопичення й розподілу тепла та води в

будівлі за рахунок зв’язків між баками накопичення води на різних поверхах, можливості окремо акумулювати тепло для опалення та нагріву води для споживання, можливості підключатись до різних теплових акумуляторів різними квартирами на поверсі.

Для автоматизації описаної системи накопичення й постачання води та тепла в будівлі пропонується вирішити наступні завдання з метою інтелектуального керування:

1. Оптимізація кількості води, що накопичується на кожному поверсі, на основі аналізу історії витрати води споживачами.
2. Оптимізація кількості накопиченої теплової енергії в кожному акумуляторі на основі аналізу історії витрат енергії на опалення приміщень та нагрів води для споживання.

В умовах обмежених ресурсів система керування приймає рішення щодо кількості води і тепла, які потрібно накопичити, на основі прогностичних моделей, які прогнозують кількість тепла й води, що використовує споживач, на добу вперед (пов'язано з періодом появи інтервалу з дешевою енергією та циклічністю сонячної активності).

Також система керування на основі моделі поведінки користувача та з урахуванням економічних критеріїв приймає рішення щодо того, скільки теплової енергії потрібно накопичити на опалення, а скільки на підігрів води. Окрім цього, система оптимізує використання накопиченої води й теплової енергії за умови зміни тактики їх споживання.

Прогнозовані наукові результати:

- закономірності зміни в часі витрат води, що дозволяють прогнозувати витрати води на добу вперед;
- закономірності зміни в часі витрат тепла на опалення, що дозволяють прогнозувати витрати енергії на опалення на добу вперед;
- закономірності зміни в часі витрат тепла на підігрів води для користування, що дозволяють прогнозувати витрати енергії на підігрів води на добу вперед;
- закономірності зміни витрат вище означених ресурсів, що дозволяють прогнозувати їх витрати на короткотривалому діапазоні часу за умови зміни тактики їх споживання.

Прогнозовані практичні результати:

- метод непрямого визначення накопиченої й витраченої теплової енергії в теплових водяних акумуляторах;
- модель поведінки користувача щодо витрат води й тепла;
- алгоритм оптимізації витрат води й тепла за умови зміни їх споживання;
- алгоритм керування запасами води й тепла на основі прогнозування добового споживання цих ресурсів.

Науковою новизною є отримання нових залежностей витрат ресурсів в будівлі від певних ситуацій, що мають місце в будівлі та є відображенням поведінки користувачів.

Висновки. В цій роботі запропонований підхід, який дозволяє вибудувати систему акумулювання води й тепла в будівлі з метою підвищення її стійкості до несприятливих зовнішніх умов та зменшення витрат за споживані ресурси. Система керування акумулюванням тепла й води буде спиратися на прогностичні моделі споживання ресурсів мешканцями будівлі, та при керуванні запасами тепла й води буде використовувати методи оптимізації за критерієм мінімальних питомих витрат на споживані ресурси.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IEA. (2023). Breakthrough Agenda Report 2023: Buildings.
2. Borowski, M., Rathnayake, C. M., & Zwolińska-Glądys, K. (2025). Nearly Zero-Energy Buildings (NZEBs): A Systematic Review of the Current Status of Single-Family Houses in the EU. Energies, 18(12), 3215. https://doi.org/10.3390/en18123215
3. Frank , M., Borst , F., Theisinger , L., Lademann , T., Fuhrländer-Völker , D., & Weigold , M. (2024). Framework for Implementation of Building Automation Control Programs for Industrial Heating and Cooling Systems. Energies, 17(21), 5361. https://doi.org/10.3390/en17215361
4. Krinitsky, M., & Averbukh, M. (2024). Control and Managing of Individual Solar Water Heating Systems in an Apartment Complex. Electronics, 13(12), 2305. https://doi.org/10.3390/electronics13122305
5. Kapsalis, Vassilis & Hadellis, Loukas. (2017). Optimal operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing. Sustainable Cities and Society. 31. 10.1016/j.scs.2017.02.013.

УДК 681.5:631.531:004.9

О.В. Карпенко[1], І.Ю. Герасименко[1]

[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ВИРОЩУВАННЯМ РІЗНИХ КУЛЬТУР В БАГАТОЯРУСНІЙ ГІДРОПОННІЙ УСТАНОВЦІ

Анотація. Робота присвячена розробці підходу до автоматизації процесів вирощування рослин у багатоярусних гідропонних установках із використанням сенсорних систем, IoT-технологій та алгоритмів штучного інтелекту. На основі аналізу сучасних досліджень обґрунтовано доцільність впровадження адаптивного керування параметрами середовища (pH, EC, температура, освітлення), що дозволяє зменшити споживання ресурсів, підвищити врожайність і стабільність росту, а також окреслено очікувані теоретичні та практичні результати.

Ключові слова: *Багатоярусна гідропонна установка, автоматизація процесу керування вирощуванням,*

Вступ. Актуальність розробки автоматизованих гідропонних установок зумовлена стрімким зростанням населення планети та дедалі більш відчутним дефіцитом орних земель і прісної води. Забезпечення продовольчої безпеки вимагає переходу до інноваційних, ресурсоефективних технологій вирощування

soilless agriculture, здатних забезпечити стабільні врожаї незалежно від кліматичних умов [1].

З перспективи ефективності використання ресурсів такі системи забезпечують помітну вигоду: точне дозування та контроль складу поживних розчинів за показниками pH і електропровідності зменшують втрати ресурсів і стабілізують ріст рослин. У довгостроковій перспективі це дозволяє скоротити споживання води приблизно на 90 %, а також зменшити концентрацію поживних речовин до 75 % від оптимальної без втрати якості врожаю, що робить вирощування більш економічно ефективним та сталим [2].

Не менш важливим аспектом розробки таких систем є їх безпосередній позитивний вплив на рослини: точне регулювання умов вирощування у межах оптимальних параметрів сприяє скороченню часу вегетації та покращенню якості продукції, роблячи рослини більш здоровими та врожайними [3].

Постановка завдання. На основі сучасних рішень у сфері багатоярусних гідропонних систем вирощування рослин запропонувати концепцію побудови системи автоматизованого керування технологічними процесами, визначити основні завдання дослідження та окреслити очікувані теоретичні та практичні результати.

Основний зміст роботи. Розглянемо декілька запропонованих рішень цього завдання.

У науковій статті [3] розглядається підхід до підвищення ефективності гідропонного вирощування за допомогою інтернету речей (IoT) та алгоритмів машинного навчання. Дослідники розробили інтелектуальну систему Smart Hydro Kit, що забезпечує автоматичний моніторинг параметрів середовища – таких як pH, електропровідність, температура, вологість та вміст розчинених речовин (TDS). Отримані дані передавалися в реальному часі через Wi-Fi-модуль ESP32 на платформу ThingSpeak, що дозволяло здійснювати дистанційний контроль за станом установки.

У роботі проведено порівняльний експеримент з вирощування ріпчастої цибулі (Allium cepa) у традиційному ґрунтовому середовищі та у гідропонній системі типу DWC (Deep Water Culture). Результати показали, що в умовах автоматизованої гідропонної установки рослини продемонстрували вищі темпи росту та скорочений період вегетації. Автори також здійснили моделювання процесу за допомогою симулятора AquaCrop, результати якого підтвердили кореляцію між реальними вимірюваннями та розрахунковими даними, що засвідчує надійність запропонованої системи моніторингу.

Стаття підкреслює перспективність поєднання технологій IoT, сенсорних мереж і методів машинного навчання для побудови інтелектуальних систем автоматизованого керування гідропонними процесами. Отримані результати доводять доцільність використання таких систем для підвищення сталості агровиробництва, оптимізації ресурсів і впровадження дистанційного контролю в багатоярусних установках. Дослідження може бути використане як науково-

практичне підґрунтя для розроблення власних систем автоматизації та моделювання в сучасних гідропонних комплексах.

У статті [4] проведено систематичний огляд сучасних підходів до автоматизованого дозування поживного розчину у гідропонних системах із контролем pH та електропровідності (EC). Автори проаналізували понад 80 наукових публікацій, класифікували існуючі керуючі рамки та визначили ключові змінні, які впливають на точність і ефективність систем: pH, EC, TDS, об'єм і температуру розчину.

Результати показали, що два основні підходи до автоматизації (зворотний зв'язок (Feedback loop) та прогностична аналітика (Predictive analytics)) мають свої переваги і недоліки. Системи Feedback loop реагують на відхилення параметрів від заданих значень, тоді як прогнозна аналітика дозволяє передбачати зміни і здійснювати превентивне дозування, підвищуючи стабільність і продуктивність рослин. Автори також відзначають необхідність одночасного контролю кількох параметрів (MIMO) замість традиційного підходу SISO, що контролює лише один параметр.

Стаття підкреслює актуальність інтеграції прогностичних моделей і багато стратегій керування для підвищення точності, надійності та масштабованості автоматизованих гідропонних систем. Отримані висновки можуть бути використані як наукове підґрунтя для розробки інтелектуальних систем автоматичного керування поживними розчинами у багатоярусних гідропонних установках, забезпечуючи стабільні умови росту та оптимізацію ресурсів.

У статті [5] представлено розробку інтелектуальної системи керування гідропонною установкою, що поєднує технології штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT) та автоматичного регулювання параметрів середовища. Метою роботи є створення системи, здатної самостійно аналізувати дані про стан рослин і середовища, передбачати їх зміни та здійснювати оптимізацію процесів у реальному часі без участі оператора.

Архітектура системи складається з мережі датчиків для вимірювання температури, вологості, pH, EC, рівня води, освітленості, які передають дані до мікроконтролера через IoT-модуль. Алгоритм штучного інтелекту, побудований на основі нейронної мережі типу LSTM (Long Short-Term Memory), здійснює прогнозування змін умов середовища та формує керуючі сигнали для автоматичного дозування поживного розчину, корекції pH і регулювання інтенсивності освітлення. Для валідації використано експериментальну установку NFT-типу з вирощуванням зелених культур у контрольованому середовищі.

Результати експериментів показали, що система з AI-керуванням зменшила коливання параметрів середовища в межах 5 %, що сприяло підвищенню однорідності росту рослин і скороченню середнього часу вегетації на 10–15 %. Порівняно з традиційним ручним керуванням, споживання поживного розчину знизилось на ~18 %, а витрати електроенергії на освітлення – на ~12 % завдяки адаптивному керуванню LED-системою.

Автори роблять висновок, що впровадження штучного інтелекту у гідропонні системи відкриває новий рівень адаптивного, енергоефективного та ресурсозберігаючого землеробства, здатного підтримувати стабільну якість продукції незалежно від зовнішніх умов. Дослідження може слугувати основою для розробки алгоритмів оптимізації у багатоярусних гідропонних установках, де важливо забезпечити одночасне керування кількома взаємопов'язаними параметрами середовища.

На основі огляду існуючих рішень в сфері систем керування вирощуванням культур, враховуючи їх переваги та недоліки, пропонується наступний підхід в розробці системи керування процесами вирощування культур в багатоярусній гідропонічній установці.

Система керує насосом, який заповнює бак для замішування поживного розчину, та перистальтичними насосами для додавання концентратів та регуляторів кислотності. В процесі підготовки поживного розчину система порівнює задані параметри розчину з даними з датчиків (електропровідність, кислотність, склад розчину, вага води в баку) та додає необхідну кількість концентратів для досягнення необхідного рівня концентрації, розмішуючи розчин за допомогою занурювального насосу.

Коли розчин готовий, система вмикає насос, який викачує розчин з баку для замішування в кожен додатковий піддон, який обирається за допомогою електромагнітних клапанів. З додаткових піддонів розчин надходить в основні, де ростуть рослини, шляхом вмикання відповідних насосів. Для запобігання перевищення рівня розчину в основному піддоні буде вмонтований злив за рівнем, звідки розчин буде повертатись до додаткового піддону. Після певного часу рідина буде повертатись в додатковий піддон через регуляційний клапан самопливом за рахунок різниці в рівні. Ці кроки повторюються n-разів на годину в залежності від технології вирощування певної культури.

Періодично розчин з додаткових піддонів зливається в бак для замішування з метою корекції складу розчину відповідно до інформації з датчиків та заданих параметрів концентрації, кислотності та електропровідності.

Після завершення подачі суміші бак для замішування заповнюється чистою водою, та насос проганяє її через всю систему з метою її очищення. Забруднена вода в результаті зливається в каналізацію.

Прогнозовані наукові результати:

- алгоритм керування системою замішування поживного розчину, розподілу його по піддонах, циклу поливу та аерації, коригування концентрації розчину, промивки системи від залишків;
- вплив змін концентрації поживного розчину та його рівня в основному піддоні з рослинами на якість та швидкість росту рослини;
- база даних ефективності вирощування різних культур в залежності від параметрів поживного розчину.

Наукова новизна полягає в розробці системи керування окремими ярусами гідропонної установки, що дозволяє вирощувати різні культури в одній системі.

Висновок. В роботі запропоновано концепцію побудови системи автоматизованого керування технологічними процесами вирощування різних культур в багатоярусній гідропонній установці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sambo, P. et al. (2019). Hydroponic Solutions for Soilless Production Systems. Frontiers in Plant Science. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6668597
2. Herrera-Arroyo, R., et al. (2025). Smart Hydroponic Cultivation System for Lettuce (Lactuca sativa). MDPI / Applied Sciences. https://www.mdpi.com/2571-5577/8/4/110
3. Machine learning insights for sustainable hydroponic cultivation and growth monitoring of Allium cepa using Smart Hydro Kit (Dutta M., Gupta D., Juneja S., AlNadhari S., Belhaouari S. B., 2025). https://colab.ws/articles/10.1038%2Fs41598-024-82920-8
4. Sulaiman H., Yusof A., Nor M. K. "Automated Hydroponic Nutrient Dosing System: A Scoping Review of pH and Electrical Conductivity Dosing Frameworks" (AgriEngineering, 2025) https://www.mdpi.com/2624-7402/7/2/43
5. Baraskar T., et al. (2025). "AI-Powered Automated Hydroponic System for Smart Agriculture" (Elsevier / ScienceDirect) https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016125004236

УДК 681.586:631.344.8

Є.І. Донченко[1], В.В. Масик[1], О.В. Разживін[2]
[1]Донбаська державна машинобудівна академія, Тернопіль, Україна
[2]ТОВ«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ МОДУЛЯ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ ТЕПЛИЦІ

Анотація. Описано процес створення універсального модулю вимірювання температури (повітря та ґрунту), вологості ґрунту та локального освітлення теплиці з метою збільшення врожайності.

***Ключові слова**: модуль вимірювання, датчик вологості ґрунту, датчик температури, мікроконтролер*

Вступ. Сьогодні рослинництво для підвищення врожайності потребує більш точного витримування певних кліматичних умов, зокрема, контроль вологості ґрунту зменшує витрати води та не дає пересихати/перенасичуватись ґрунту. Контроль температури ґрунту дає кореневій системі рослин найбільш сприятливі умови для розвитку. Контроль температури повітря дає змогу створити найбільш сприятливі умови для розвитку стебелів рослин. Контроль освітленості дає змогу покращити фотосинтез рослин, що в свою чергу позитивно впливає на розвиток рослин. Якісний розвиток рослин є запорукою високого врожаю.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- Визначення, в яких умовах буде працювати модуль вимірювання;
- Визначення необхідних елементів модулю вимірювання (датчики температури, датчик вологості ґрунту, датчик освітлення) та створення електричної принципової схеми;
- Визначення форми друкованої плати та розведення доріжок на ній.

Основний зміст роботи. Під час виконання даної роботи були використані наступні наукові та інженерні методи:

1. Системний аналіз: Використаний для визначення умов експлуатації та декомпозиції задачі (визначення необхідних параметрів контролю: вологість, температура, освітленість).

2. Порівняльний аналіз: Застосований для вибору оптимальної елементної бази (мікроконтролера, датчиків, драйверів та компонентів живлення) на основі технічних вимог та вартості.

3. Схемотехнічне проєктування: Метод розробки електричних принципових схем для узгодження всіх компонентів модуля (схеми живлення, датчиків, мікроконтролера та інтерфейсу). 4. Проектування друкованих плат (PCB Layout): Використане для фізичної реалізації пристрою, трасування доріжок та компонування елементів у трьох частинах плати.

У якості інструментів комп'ютерного моделювання та проектування було використано програмний комплекс EasyEDA Pro.

Визначення умов експлуатації модулю вимірювання.

Модуль вимірювання буде працювати у теплиці, занурений у ґрунт, тобто в умовах підвищеної вологості та агресивного впливу добрив. Тому модуль повинен бути герметичним. Необхідно потурбуватися про захист відкритих електричних контактів від корозії, найдешевше і найпростіше це можна зробити покривши елементи і краї плати компаундом (епоксидна смола та скловолокно). Завдяки цим заходам модуль має бути досить міцним, це зменшить ймовірність виходу з ладу через необережне користування.

Визначення необхідних елементів для модулю вимірювань.

Модуль вимірювання має датчики температури ґрунту та повітря, вологості ґрунту та освітленості. Для збору інформації та подальшої її обробки використано мікроконтролер. Для зв’язку модуля з верхнім рівнем запропоновано використання шини K-line. Так як модуль може бути встановлено на значній відстані від джерела живлення і пристрою зчитування інформації, було прийнято рішення передбачити напругу живлення 24В постійного струму, що є компромісом з точки зору енергозбереження та безпеки користувачів в умовах тепличного господарства. На рисунку 1 показана структурна схема модулю вимірювань.

Вибір датчиків температури повітря та ґрунту.

Основні вимоги до датчика температури є точність вимірювання, діапазон вимірювання та ціна. У теплиці під час її експлуатації середня температура 20°С. Точність вимірювань повинна бути ±1°С. Ціну бажано обмежити на рівні до 100грн. Прийнято мікросхему DS18B20 у корпусі TO92. Цей датчик має діапазон вимірювання -55…+125°С, точність вимірювань ±0.5°С. Зв'язок з мікроконтролером здійснюється по інтерфейсу 1-wire [0]. Схема підключення датчиків температур показана на рисунку 2.

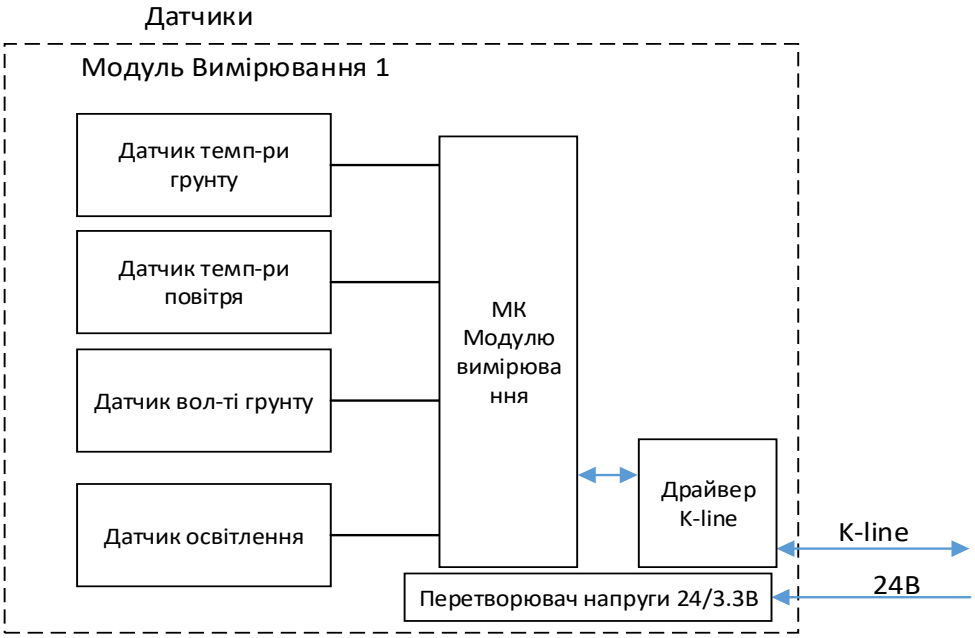


Рис. 1. Структурна схема модулю вимірювання

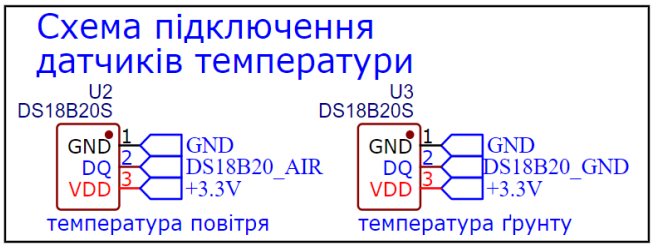


Рис. 2. Схема підключення датчиків температури

Вибір датчика освітленості

У якості датчика освітленості виберемо мікросхему BH1750FVI [2] з I2C інтерфейсом і діапазоном вимірювання освітленості 0…65535 Лк. Схема підключення наведена на рисунку 3.

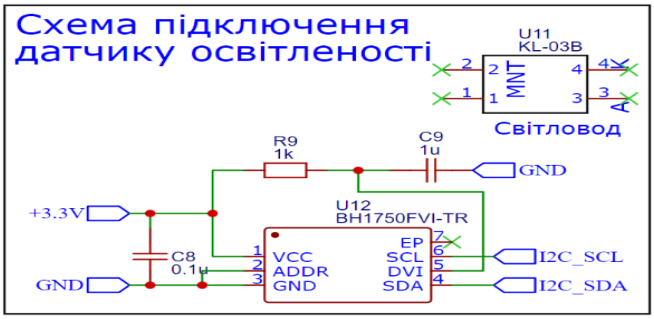


Рис. 3. Схема підключення датчика освітленості

Вибір датчика вологості ґрунту.

Датчик вологості ґрунту побудовано на основі вже існуючого датчика вологості ґрунту [0] з ємнісним чутливим елементом. Запропоновано замість таймеру[3] надавати високочастотний сигнал від мікроконтролеру, а корисний сигнал обробляється за допомогою АЦП. Для узгодження опорів чутливого елементу та амплітудного детектору використано мікросхему підсилювача U9.

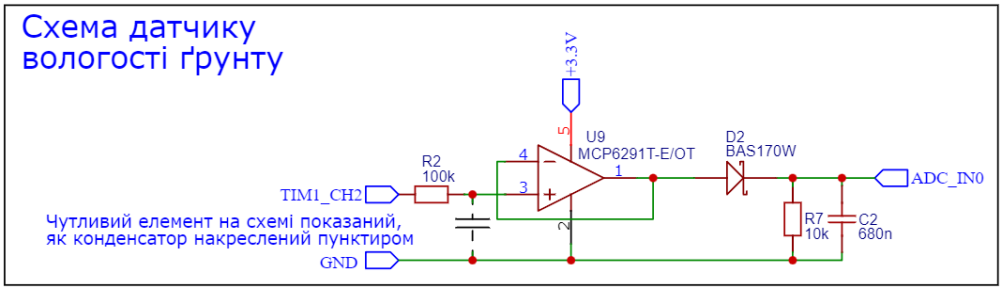


Рис. 4. Схема датчика вологості ґрунту

Вибір мікросхеми драйверу K-line.

У якості драйверу K-line використаємо мікросхему E-L9637D013TR [0] яка з мікроконтролером зв’язується по інтерфейсу UART. Схема підключення показана на рисунку 5. Надійність забезпечує використання захисних елементів.

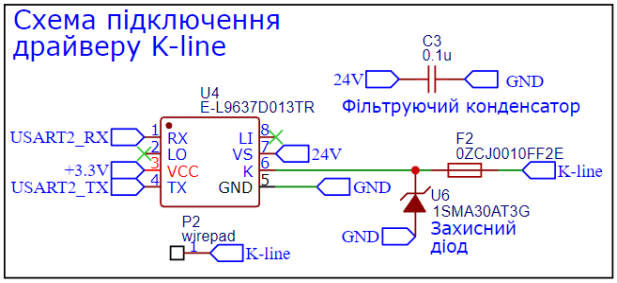


Рис. 5. Схема підключення драйверу K-line

Вибір схеми живлення

Так як всі елементи схеми живляться від 3.3В, а сам модуль отримує ззовні 24В, то було застосовано понижуючий перетворювач напруги LP2950CDT-3.3RKG [5]. Схема живлення наведена на рисунку 6.

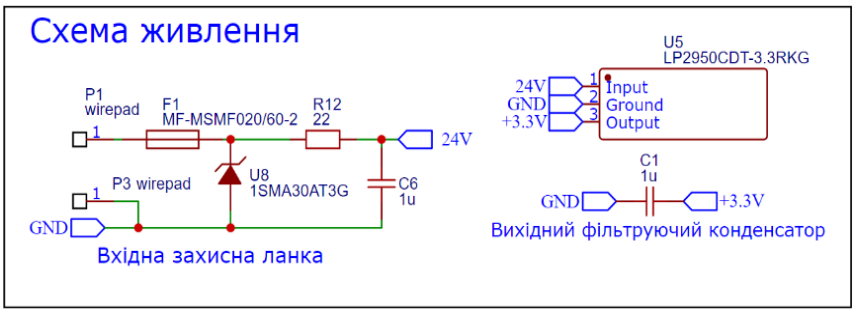


Рис. 6. Схема підключення живлення

Вибір мікроконтролеру.

Мікроконтролер повинен бути недорогим, та головне, за сучасних умов, широко представлений на ринку. Таким вимогам відповідає STM32G030K6, початкового рівня, проте достатньо сучасний мікроконтролер. Схема підключення показана на рисунку 7.

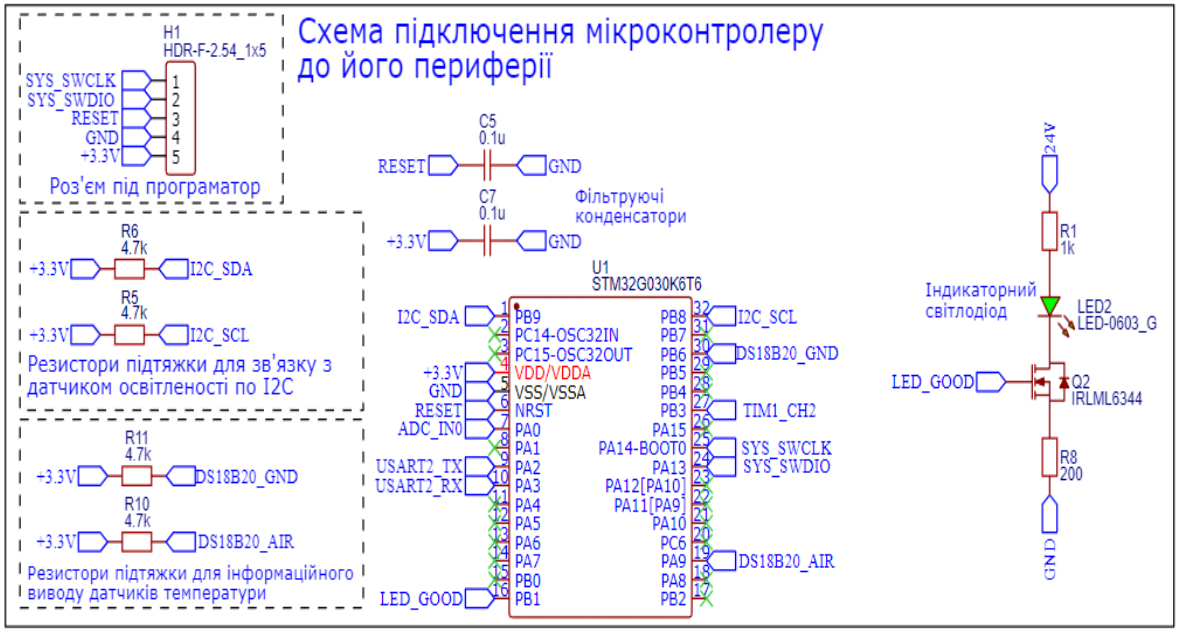


Рис. 7. Схема підключення мікроконтролеру до його периферії.

Визначення форми плати та розведення доріжок на ній.

Друкована плата поділяється на 3 частини: Перша – це щуп, що занурюється в землю. У ньому є датчик температури ґрунту і датчик вологості ґрунту. Друга – плата контролера та датчик температури повітря. Третя – виносний щуп датчика локального освітлення рослин.

Перша частина креслення друкованої плати показана на рисунку 8.

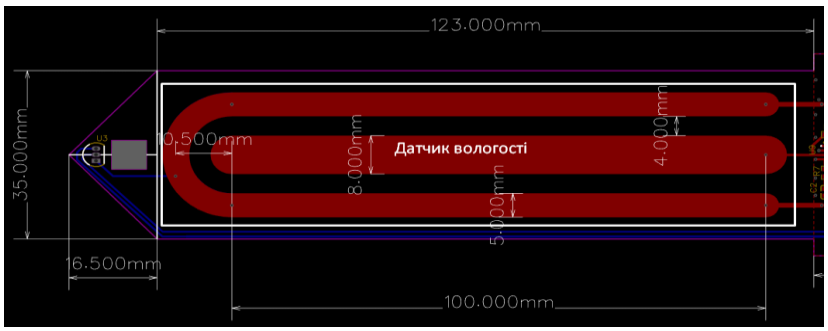


Рис. 8. Перша частина креслення друкованої плати модулю вимірювання.

На зворотній стороні плати розташована друга половина датчика вологості, яка має таку саму структуру.

Друга частина містить в собі датчик температури повітря, мікроконтролер, драйвер K-line та живлення. Креслення другої частини показано на рисунку 9.

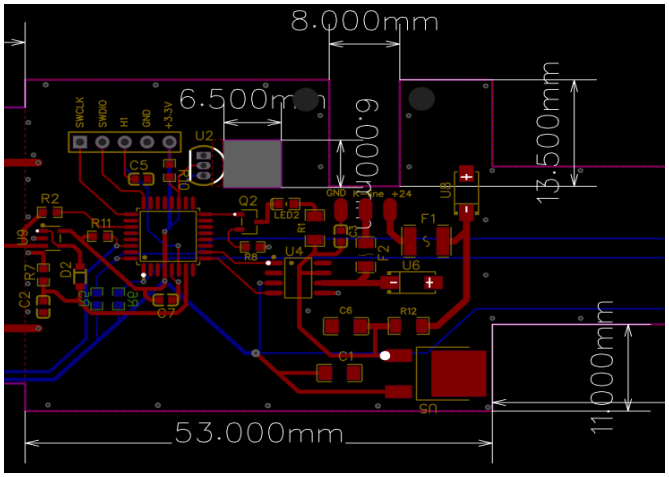


Рис. 9. Креслення другої частини друкованої плати модулю вимірювання

На третій частині друкованої плати розташований датчик освітленості, що віддалений від інших частин плати. Це зумовлено тим, що листя від рослин можуть перекривати датчик і це може спотворити показники про освітлення. На рисунку 10 показано креслення третьої частини друкованої плати.

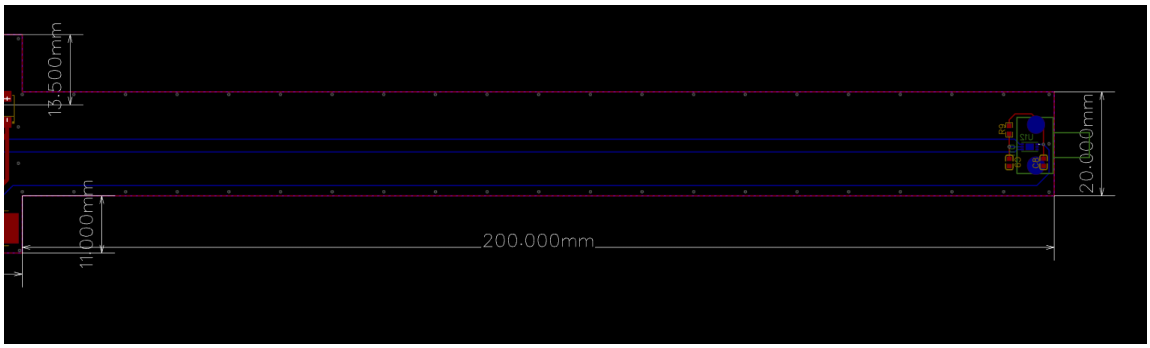


Рис. 10. Третя частина друкованої плати модулю вимірювання

Наукова новизна розробки полягає у комплексному інженерному рішенні для моніторингу агротехнічних параметрів теплиць. На відміну від типових модулів, запропонований пристрій вирізняється оригінальною трикомпонентною конструкцією друкованої плати, яка фізично розділяє ґрунтовий щуп, основний блок електроніки та виносний датчик освітленості.

Новизна також полягає у схемотехнічній реалізації каналу вимірювання вологості: замість стандартного таймера NE555 використано формування тестового сигналу безпосередньо від мікроконтролера та застосовано зовнішній операційний підсилювач (U9) для узгодження та детектування, що дозволяє обробляти сигнал напряму через АЦП мікроконтролера.

Висновки. В результаті роботи було спроектовано універсальний модуль вимірювання, вирішивши наступні задачі:

– Визначено умови експлуатації (підвищена вологість, агресивне середовище), що обумовило необхідність герметизації плати компаундом та вибору живлення 24В.

– Проведено вибір елементної бази, що включає мікроконтролер STM32G030, датчики DS18B20 (температура) та BH1750 (освітленість), а також розроблено власну схему вимірювання вологості.

– Розроблено конструкцію друкованої плати, що поєднує щуп для ґрунту та винесений датчик освітленості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. DS18B20 datasheet [Електроний ресурс] – режим доступу: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html
2. BH1750FVI datasheet [Електроний ресурс] – режим доступу: https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf?srsltid=AfmBOop32MZLyqeCqjuMUXZrVTokVPPWwHwE5ckdOcvrPiXl0xNPjONv
3. Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://thecavepearlproject.org/2020/10/27/hacking-a-capacitive-soil-moisture-sensor-for-frequency-output
4. E-L9637D013TR datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.st.com/resource/en/datasheet/l9637.pdf
5. LP2950/LP2951 Voltage Regulator: Datasheet [Електронний ресурс] / Onsemi. – Режим доступу: https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/lp2950-d.pdf

УДК 621.365.2:681.5

О.І. Сімкін[1], А.Б. Ісаєв[1], М.В. Опанащук[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПІДСИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ АСУТП НАГРІВУ МЕТАЛУ В ПРОХІДНІЙ ПЕЧІ

Анотація. Описано напрями удосконалення роботи підсистеми керування автоматизованої системи керування технологічним процесом (далі - АСКТП) нагріву металу в прохідній печі. Покращення досягається за рахунок використання двосхідчастових керуючих впливів для локальних систем регулювання зонних температур та використання трьохмірної математичної моделі оцінки температурного стану заготовок, що нагріваються в печі до необхідної температури.

***Ключові слова**: прохідна нагрівальна піч, АСУТП, математична модель нагріву, підсистема керування, система автоматичного регулювання, збурення за завданням.*

Вступ. Підсистема керування АСКТП нагріву прохідної печі забезпечує розрахунок та реалізацію керуючих впливів в стандартні локальні системи регулювання температурами (або температурами поверхні металу) та співвідношенням «паливо-повітря» в опалювальних зонах печі та тиском в печі. Основні функції підсистеми:

1. Автоматичне підтримання заданого температурного режиму.
2. Автоматичне підтримання заданого теплового режиму.
3. Контролює та регулює параметри нагрівання (температура, тиск, час).
4. Обробка інформації про технологічний процес з поточної та архівної бази даних для обчислення керуючих впливів.

Постановка задачі. На сьогодні існують декілька проблем стосовно управління нагрівом металу в прохідних печах.

З одного боку, розрахунок керуючих впливів (поточних заданих значень в локальні системи регулювання температури) базується на показниках поточного теплового стану садки (температури верхньої та нижньої поверхні, середньомасової температури, перепаду температур), і якість моделювання нагріву позначається на точності розрахунків [1].

Крім того, на теперішний час є суттєві проблеми щодо реалізації цих керуючих впливів в умовах нерівномірного темпу роботи печі.

З іншого боку, стандартними системами регулювання (далі - САР) кожної опалювальної зони нагрівальної печі є САР температури зони (інколи – поверхні металу) та САР співвідношенням «паливо-повітря»), які працюють одночасно, при чому САР температури зони отримує нове задане значення температури та на виході змінює витрату палива, а САР співвідношення, в свою чергу, підтримує відповідне значення витрати повітря задля забезпечення якісного спалювання палива. Зміна заданого значення зонної температури здійснюється досить часто в залежності від параметрів садки та продуктивності прокатного стану, тому

якість перехідного процесу суттєво впливає на знос механічної частини засобів автоматизації, так і на споживання газу.

Основний зміст роботи. Для виконання роботи булі використані наступні методи та інструменти:

- авторський програмний комплекс для дослідження нагріву слябів в 7-зонній методичній печі;
- програми Matlab, Simulink.

Програмний комплекс містить одновимірну, двовимірну та тривимірну математичні моделі нагріву слябів в 7-зонній печі з реалізованими методом налаштуванням цих моделей за результатами експериментальних прогонок слябів з зачеканеними в них термопарами. Під час прогонок одночасно з температурою експериментального слябу фіксувалися наступні параметри температурного та теплового режимів: температури зон печі, витрати природного газу та повітря в зонах та на всю піч, тиск в печі, параметри садки тощо. Обробка даних 8 таких прогонок показала, що тривимірна модель більш якісно відтворює результати експериментів і, відповідно, надати більш точну інформацію для розрахунків керуючих впливів в локальні системи регулювання.

Для вирішення проблеми підвищення точності регулювання автори вважають за необхідне для видачі (реалізації) уставок замість односхідчастого варіанту зміни завдання в локальні системи регулювання скористатися двохсхідчастим [1]. При застосуванні цього варіанту величина уставки (зміна заданого значення) видається в систему не одразу, а двома частинами, при чому спостерігається суттєво зменшення максимального динамічного перевищення (більш ніж 3,5 рази) в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом. Для багатьох систем автоматичного регулювання це, крім того, дозволить зменшити знос механічної частини засобів автоматизації.

Наукова новизна розробки складається в використанні підсистемою управління в якості базової моделі оцінки температурного стану садки трьохмірної математичної моделі з одночасним застосуванням двосхідчастових керуючих впливів для локальних систем регулювання зонних температур.

Висновки. Реалізація віще вказаних пропозицій дозволить підвищити якість управління (точність нагріву) та зменшити умовні витрати палива в цілому на 2-3%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mathematical modeling of heat exchange processes when heating metal in a furnace / Viktor Aulin, Mykola Bosiy, Volodymyr Kropivnyi, Olexandr Kuzyk, Alena Kropivna // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2021. — Vol 104. — No 4. — P. 123–130.
   DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.04.123
2. Ісаєв, А., Мірошниченко, В., Койфман, О., Сімкін, О. Застосування двосхідчастого вхідного впливу для зменшення динамічного відхилення перехідного процесу за завданням у системах автоматизованого управління. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 2024. 48. С. 92-103.
   DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310687

3. Ісаєв А.Б. Поліпшення динамічної точності та швидкодії перехідного процесу за завданням при використанні вхідного впливу з двох сходинок. Тези конференції. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”: conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 2. 368 p

УДК 581.5, 62-533.65

М.М. Антіпов[1], О.В. Суботін[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ПІДХОДИ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БАШТОВОЇ ГРАДИРНІ

Анотація. Виконано аналіз існуючої системи керування баштової градирні й сформульовані технічні вимоги до неї. Проведено аналіз шляхів зниження витрат енергоресурсів при роботі градирні. З’ясовано, що зменшення витрат енергоресурсів баштової градирні можливо шляхом модернізації системи керування подачею води до градирні з застосуванням контуру витрати води.

Ключові слова: *баштова градирня, технологічний процес, модернізація, система керування, витрати води, температура, електропривод насосу, частотне регулювання кутової швидкості.*

Вступ. Об'єктом дослідження є автоматизована система керування подачею води до баштової градирні площею 1600 м^2. Апаратура для системи була розроблена понад сорок років тому. Вона морально застаріла. Практика її експлуатації показала ряд недоліків [1].

Реалізація системи керування в базовому варіанті на релейно-контакторній апаратурі знижує надійність і захист градирні від збоїв в роботі, має великі габарити, достатньо високі витрати електроенергії, знос механічних вузлів, високі вимоги до обслуговування. Хоча дана система має просту математичну основу й наочність, її застосування не дозволяє підвищити продуктивність обладнання. Датчик температури на валу двигуна не дозволяє визначати весь діапазон температур нагрівання. При критичній температурі нагріву відбувається спрацьовування датчика, що призводить до вимкнення двигуна насоса і зупинці технологічного процесу. Також суттєвим недоліком є можливість роботи тільки в ручному режимі.

Постановка задачі. Проведений аналіз базової системи керування вказує на її недосконалість, що підтверджує велика кількість недоліків. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для підвищення продуктивності доцільно модернізувати базову систему керування градирні з застосуванням контуру витрати води.

Основний зміст роботи. Для усунення означених недоліків проводиться, як правило, повна модернізація градирні з заміною застарілого обладнання, апаратури та виконавчих органів на більш сучасні. При цьому треба розуміти, що проведення таких масштабних робіт з модернізації градирні доцільно за умови, що несуча конструкція градирні здатна витримати ще наступні 10…15 років експлуатації. При негативному висновку правильніше зробити заміну на новий пристрій [2].

Найбільш перспективною є мікропроцесорна система керування, оскільки вона дозволяє врахувати вимоги процесу охолодження води з максимальною ефективністю [3]. Системи керування, побудовані на основі контролерів є універсальними, уніфікованими, що дозволяє скоротити витрати й час на переобладнання і модернізацію існуючих систем. Дані системи є ключовим елементом в повній автоматизації системи управління, так як з'являється можливість організації багаторівневого управління технологічним процесом. Недоліками таких систем є досить висока вартість, нестійкість до електромагнітних завад, неможливістю прямого управління силовими ланцюгами. Для створення системи керування сучасного рівня використовуються мікроконтролери, що відповідають високим вимогам до надійності, точності, швидкодії, простоті збору інформації і видачі керуючих впливів. Отже, перехід з релейно-контакторної схеми керування на контролерну передбачає значні удосконалення, що приведуть до економії електроенергії, підвищення якості і точності роботи, продуктивності, зручностей керування процесом в зв'язку з поліпшеними засобами індикації та введення інформації, зменшенням розмірів вузла управління.

Керування приводом базової системи керування здійснювалося двигуном постійного струму. З економічної точки зору застосування такого типу двигуна не дуже вигідно. Для усунення цього недоліку можна застосувати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Регулювання швидкості двигуна можна досягти, застосувавши асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з частотним регулюванням кутової швидкості приводу [4].

Великою перевагою частотного регулювання є можливість реалізації високих регулювальних властивостей, які не поступаються приводу постійного струму. Частотне регулювання кутової швидкості зазвичай плавне, безступінчасте, але вимагає застосування складного частотного перетворювача.

Наукова новизна розробки передбачається в удосконаленні математичної моделі автоматизованої системи керування подачею води до градирні, що буде відрізнятися від аналогів застосуванням контуру витрати води.

Висновки. З’ясовано, що для вдосконалення технологічного процесу треба перевести заміну релейно-контакторної апаратури, реалізувати контролерну систему керування приводом насосу, застосувати асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з частотним регулювання швидкості. Модернізація дозволить отримати та використовувати автоматичний режим роботи [5].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Блог для інженерів. Баштова градирня: веб-сайт. URL: https://www.engineer.kiev.ua/2024/10/blog-post.html.
2. 3. Гладишев Д. Г., Бродський М. О. Варіанти підсилення оболонок залізобетонних градирень залежно від конструктивних особливостей та фактичного технічного стану // Архітектурна фізика та конструкції. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. С. 254-262 с. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/may/16669/32-254-262.pdf.
3. Незола В.В., Суботін О.В. Зменшення витрат енергоресурсів баштової градирні шляхом удосконалення системи керування подачею води // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції (11-17 березня 2024 року). Черкаси, 2024. С. 20-22. URL: https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf.
4. Новіков Д.С., Суботін О.В. Програмно-апаратний комплекс для інтелектуального управління електродвигуном // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції (11-17 березня 2024 року). Черкаси, 2024. С. 234-236. URL: https://conference.ikto.net/pub/akit_2024_11-17march_1.pdf.
5. Суботін О.В., Новіков Д.С. Особливості створення комплексної інформаційної системи управління підприємством // International scientific conference "MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education": conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2024. Vol. 1. Pp. 356 - 360. DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-119

УДК 681.5:004.6

О.О. Койфман[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМНОЇ КАРТИ БЛОКУ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АРХІВНОЇ БАЗИ ДАНИХ АСУТП

Анотація. Представлено методику оптимізації режимних карт блоку повітронагрівачів доменних печей на основі інтелектуального аналізу архівних даних АСУТП. Виконано статистичний аналіз експлуатаційних параметрів за семимісячний період роботи блоку. Встановлено залежності тривалості нагріву насадки від температури купола та обсягу спожитого доменного газу для чотирьох діапазонів його середньої витрати. Коефіцієнт детермінації отриманих залежностей перевищує 0,82, що свідчить про високу адекватність математичних моделей. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для автоматизованого визначення функціональних взаємозв'язків технологічних параметрів. Результати дослідження дозволяють ідентифікувати реальний технічний стан кожного повітронагрівача та сформувати рекомендації щодо індивідуального налаштування режимів їх експлуатації для підвищення температури гарячого дуття без додаткових капіталовкладень.

***Ключові слова**: повітронагрівач, доменна піч, режимна карта, АСУТП, архівна база даних, статистичний аналіз, температура дуття, оптимізація, математичне моделювання.*

Вступ. Незалежно від технічного стану обладнання блоку повітронагрівачів, ключовим завданням системи автоматизованого керування залишається стабілізація температури гарячого дуття на заданому технологічному рівні [1-3]. Температура дуття визначає інтенсивність та ефективність доменної плавки, тому її максимізація за умови мінімальних капітальних витрат є стратегічним пріоритетом підвищення продуктивності доменного виробництва.

Традиційно підвищення температури дуття досягається через модернізацію конструкцій повітронагрівачів, впровадження прогресивних типів насадок, заміну доменного газу на природний або перехід на паралельний режим роботи блоку. Проте існує альтернативний підхід, що не потребує значних інвестицій - оптимізація параметрів системи автоматизації на основі глибокого аналізу архівних та оперативних даних АСУТП [4, 5].

Типовий блок повітронагрівачів доменної печі включає від 3 до 5 агрегатів. Кожен повітронагрівач функціонує як регенеративний теплообмінник, що працює в циклічному режимі з чергуванням двох періодів: акумуляція теплоти в насадці (нагрів насадки) та віддача теплоти холодному дуттю (нагрів дуття).

Синхронна робота блоку та безперервна подача гарячого дуття до доменної печі забезпечується чітко регламентованою режимною картою. Будь-яка зміна параметрів роботи окремого повітронагрівача неминуче впливає на функціонування всього блоку та вимагає коригування режимної карти. За послідовної схеми роботи максимально досяжна температура дуття лімітується характеристиками найменш ефективного повітронагрівача в блоці.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- Виконати комплексний аналіз архівної бази даних АСУТП блоку повітронагрівачів.
- Встановити кількісні залежності тривалості періоду нагріву насадки від максимальної температури купола та обсягу використаного палива для різних режимів його витрати.
- Сформувати практичні рекомендації щодо оптимізації режимних карт блоку повітронагрівачів.

Основний зміст роботи. Під час виконання поставлених завдань булі використані наступні методи та інструменти:

- Математичне моделювання, кореляційно-регресійний аналіз, методи описової статистики, концепція Six Sigma.
- Програмні середовища: MS Visual Studio, MATLAB, Scilab, MS Excel.

В попередньому дослідженні [5] авторами створено програмні модулі для аналізу архівної інформації АСУТП та побудови багатопараметричних функціональних залежностей з контрольованою фіксацією окремих змінних. За результатами обробки семимісячного масиву даних побудовано залежності тривалості нагріву насадки від середньої температури купола та витрати доменного газу для різних режимів інтенсивності спалювання з коефіцієнтом детермінації $R^2>0,82$ (рис. 1). На основі отриманих емпіричних залежностей ідентифіковано параметри математичної моделі процесу [6].

У ході статистичної обробки експериментальних даних весь діапазон середньої витрати доменного газу розподілено на чотири інтервали з кроком, що дорівнює стандартному відхиленню σ. Для кожного повітронагрівача блоку отримано по чотири функціональні залежності у відповідних діапазонах витрат.

Отримані функціональні залежності (рис. 1) створюють аналітичну базу для об'єктивної оцінки теплотехнічної ефективності кожного повітронагрівача та діагностики його фактичного стану.

На основі виконаного аналізу архівних даних АСУТП та встановлених закономірностей розроблено комплекс заходів оптимізації режимних карт блоку повітронагрівачів в якості адаптивної корекції режимної карти в реальному часі. Впровадження системи оперативного коригування режимної карти передбачає: застосування ідентифікованих математичних моделей для прогнозування моменту досягнення цільової температури купола; автоматичне регулювання тривалості фази нагріву на основі поточних відхилень від розрахункових траєкторій; інтеграцію алгоритмів машинного навчання для самоадаптації параметрів з урахуванням зміни зовнішніх умов та деградації обладнання

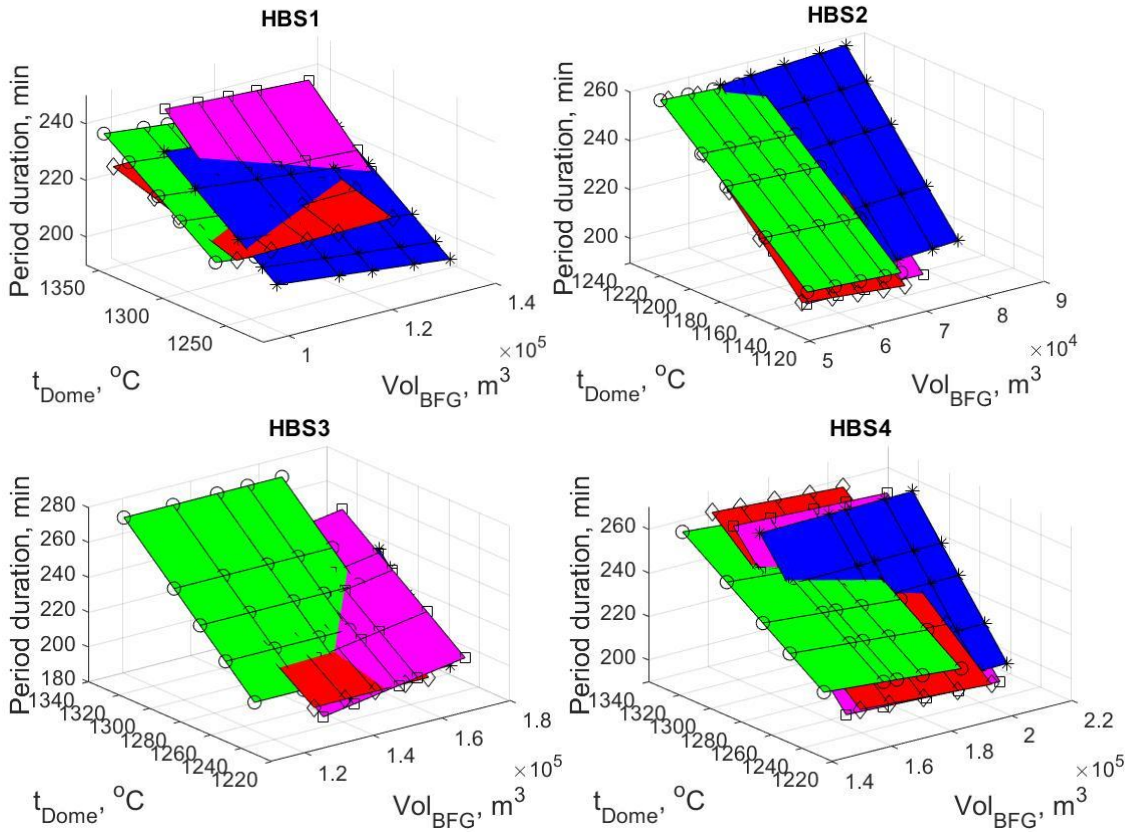
Пропонується поетапна імплементація оптимізованих режимів:

1. Експериментальна апробація індивідуальних режимів на пілотному повітронагрівачі.

2. Масштабування динамічного регулювання витрати палива на всі агрегати блоку.

3. Інтеграція алгоритмів прогнозування та адаптації в архітектуру АСУТП.

4. Безперервний моніторинг ключових показників ефективності та ітераційне налаштування.



Інтервали: [-2σ;-1σ] [-1σ;0σ] [0σ;1σ] [1σ;2σ]

Для [41584÷43784], [43784÷45984], [45984÷48184], [48184÷50384] при $\sigma = 2200\ {}^{м^3}/_{год}$

Рис. 1. Залежність тривалості періоду нагріву насадки доменного повітронагрівача (HBS1-4) від середньої температури купола t_{Dome} та використаного об'єму доменного газу Vol_{BFG} при різних діапазонах середньої витрати доменного газу за період нагріву

Оптимізація режимних карт прогнозовано забезпечить підвищення середньої температури гарячого дуття на 15-25°C, скорочення питомої витрати палива на 3-5%, зменшення стандартного відхилення температури дуття, стабілізація технологічного процесу, подовження міжремонтного інтервалу завдяки оптимізації теплового режиму.

Наукова новизна розробки полягає в розробці методології оптимізації режимних карт доменних повітронагрівачів на основі інтелектуального аналізу експлуатаційних даних АСУТП з використанням методів багатопараметричної

статистики та ідентифікації математичних моделей. Вперше побудовано сімейства емпіричних залежностей тривалості акумуляції теплоти від комплексу визначальних параметрів (температура купола, витрата та обсяг доменного газу) для індивідуальних повітронагрівачів, що забезпечує можливість диференційованого керування їх роботою в рамках єдиного технологічного блоку.

Висновки. Розроблено та експериментально апробовано методологію статистичного аналізу архівних даних АСУТП блоку повітронагрівачів, яка на основі обробки семимісячного масиву експлуатаційної інформації дозволила встановити достовірні функціональні залежності (R^2>0,82) між тривалістю фази нагріву насадки, температурою купола та обсягом доменного газу для чотирьох диапазонів його витрати, стратифікованих за концепцією Six Sigma. Створений програмний комплекс забезпечує автоматизовану діагностику ефективності функціонування кожного повітронагрівача та формування індивідуалізованих режимних карт відповідно до реального технічного стану обладнання. Впровадження запропонованої методології створює передумови для підвищення температури гарячого дуття на 15-25°C, скорочення питомих витрат палива на 3-5%, стабілізації температурного режиму та подовження міжремонтних інтервалів експлуатації без значних капітальних інвестицій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Грес Л.П., Карпенко С.А., Миленина А.Є. Теплообмінники доменних печей. Дніпропетровськ: «Пороги», 2012, 491 с.
2. Modern Blast Furnace Ironmaking / M. Geerdes et al. IOS Press, 2020. URL: https://doi.org/10.3233/stal9781643681238
3. Treatise on Process Metallurgy. Elsevier, 2014. URL: https://doi.org/10.1016/c2010-0-67121-5
4. Koyfman, O., Rukhlov, A., Rukhlova, N., Miroshnychenko, V., Proszowska, A., & Polyanska, A. (2025). Reducing emissions from hot blast stoves by configuring an automated control system. Polityka Energetyczna-Energy Policy Journal, 195-216. https://doi.org/10.33223/epj/207021
5. Koyfman, O., Simkin, O., & Serdiuk, K. (2020). Intelligence analysis method of automation control system archive database for controlling hot blast stove block. Computer Modeling and Intelligent Systems, 2608, 102–117. https://doi.org/10.32782/cmis/2608-9
6. Koifman, A., & Simkin, A. (2019). Development and Software Implementation of the Hot Blast Stove Computer Model. Computer Modeling and Intelligent Systems, 2353, 440–454. https://doi.org/10.32782/cmis/2353-35

УДК 681.511.2(075.8)

А.Б. Ісаєв[1], О.І. Сімкін[1], Р.О. Васенко[1]
[1]ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТРИФАЗНОГО ВХІДНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ЗАВДАННЯМ

Анотація. Розглянуто використання вхідного впливу за завданням, який складається з трьох складових. Наведені результати моделювання процесу регулювання за завданням, які показують, що це дозволяє покращити динамічну точність системи регулювання.

***Ключові слова**: лінійна система автоматичного регулювання, процес регулювання, вхідний вплив за завданням, динамічна точність, Simulink.*

Вступ. В коливальних процесах регулювання завжди мають місце динамічні відхилення регульованої величини від заданого значення. Покращенню цих показників приділено увагу у роботах [1-2]. Дана робота розвиває ідеї розглянуті у них.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження процесів регулювання за завданням з використанням вхідного впливу спеціальної форми. Для цього необхідно виконати наступні завдання:

– визначити форму трифазного вхідного впливу за завданням;
– побудувати модель системи автоматичного регулювання, що використовує такий вплив;
– оцінити динамічну точність процесу регулювання;
– порівняти показники динамічної точності з показниками, із [1-2].

Основний зміст роботи. Під час роботи були використані наступні інструменти:

– Microsoft Office Excel;
– Matlab, Simulink.

У роботах [1-2] було показано, що при використанні вхідного впливу за завданням, який складається з двох сходинок, можна отримати кращі показники динамічної точності порівняно із звичайним вхідним впливом. Виникла ідея по аналогії з трифазними системами електричного живлення використати трифазний вхідний вплив, який складається з трьох сходинок, які зсунуті у часі між собою на 120 градусів відносно періоду коливань регульованої величини в системі.

Спочатку була розглянута лінійна система автоматичного регулювання аналогічна до систем, які використовувалися у роботах [1-2], що складається із статичного об’єкта керування 1-го ступеню з запізненням і ПІ-регулятора. Вона налаштована на коливальність близько 30%. Модель системи була побудована у Matlab Simulink і Excel. По результатам моделювання з використанням вхідного впливу у формі однієї сходинки було визначено період коливань регульованої

величини. Відомо, що в лінійних системах показники коливань залежать тільки від параметрів регулятора та об’єкта керування і не залежать від амплітуди вхідного впливу. Таким чином період коливань можна вважати постійним.

Далі було побудовано систему регулювання з трифазним вхідним впливом за завданням рис. 1. Одну початкову сходинку вхідного впливу величиною 200 умовних одиниць, як у роботах [1-2], було розділено на три однакові сходинки рис. 2. Друга та третя сходинки вхідного впливу подаються із відставанням у часі одна від одної на третину періоду коливань регульованої величини, який був визначений раніше. Також на рис. 2 показані результати моделювання поточного значення регульованої величини для кожної сходинки окремо та їх суму.

На рис. 3 показано порівняння процесів регулювання для вхідних впливів з однією сходинкою, з двома сходинками однакової величини [1] і з трьома сходинками однакової величини. Як видно найкращу динамічну точність забезпечує вхідний вплив з трьох сходинок.

З метою подальшого покращення динамічної точності було використано підхід подібний до роботи [2]. Амплітуду сходинок було скомбіновано у відповідній пропорції рис. 4. Також на рис. 4 показані результати моделювання поточного значення регульованої величини для кожної сходинки окремо та їх суму. Порівнюючи графіки процесів регулювання на рисунках 2 та 4 бачимо, що динамічне відхилення ще зменшилося.

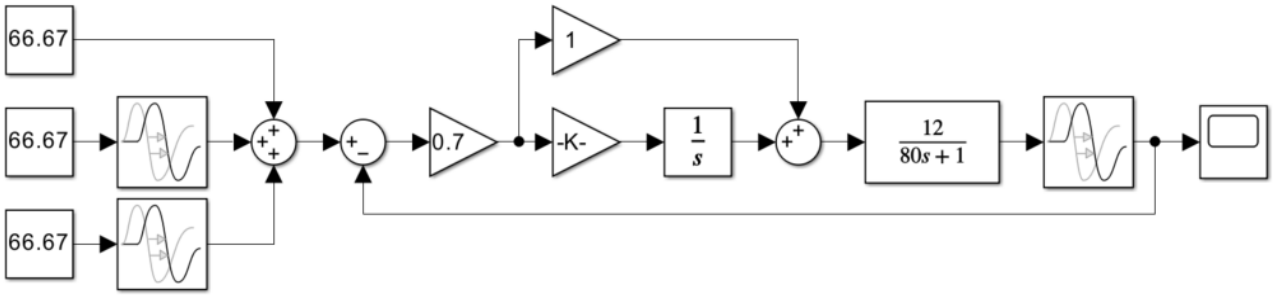


Рис. 1. Модель системи регулювання з трифазним вхідним впливом

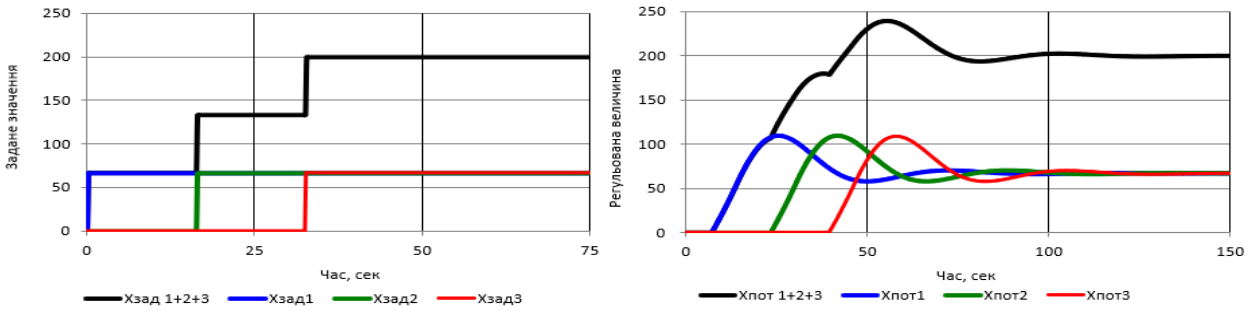
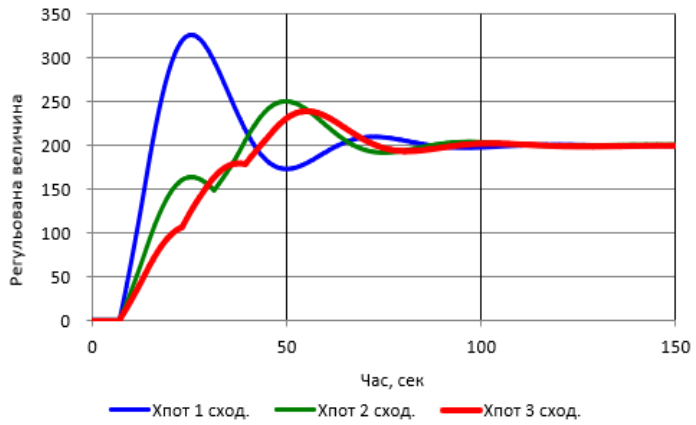


Рис. 2. Результати моделювання процесу регулювання для трифазного вхідного впливу з однаковими сходинками



Найбільше динамічне відхилення:
1 сходинка – 126,6
2 сходинки – 49,8
3 сходинки – 39,6

Рис. 3. Порівняння процесів регулювання з 1, 2 та 3 однаковими сходинками

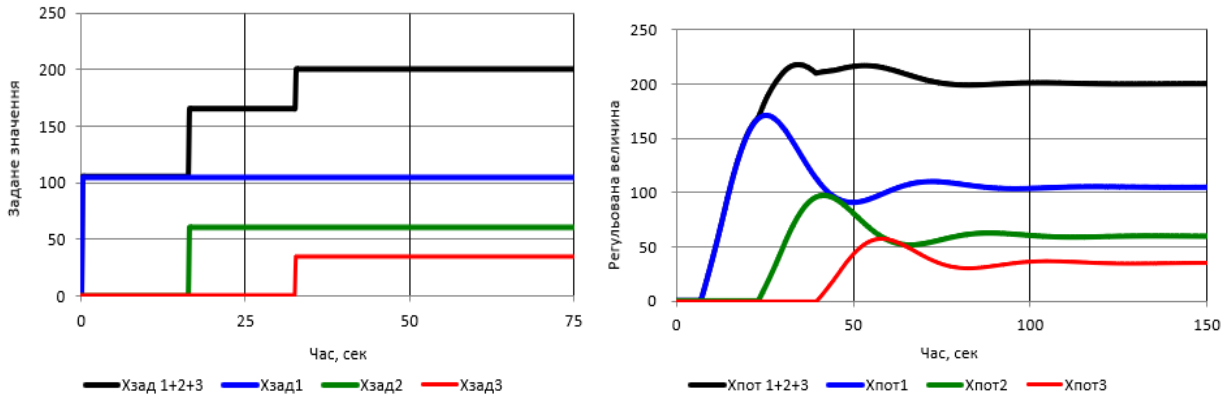
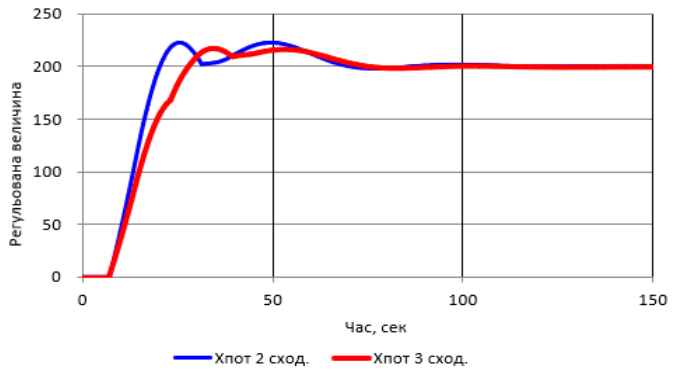


Рис. 4. Результати моделювання процесу регулювання з трифазним вхідним впливом із сходинками різної величини

На рис. 5 показано порівняння процесу регулювання при вхідному впливі двох різних сходинок, наведеного у роботі [2], з процесом для трифазного вхідного впливу із сходинками різної величини. Як видно кращу динамічну точність забезпечує вхідний вплив з трьох сходинок.



Найбільше динамічне відхилення:
2 сходинки – 22,2
3 сходинки – 17,6

Рис. 5. Порівняння процесів регулювання з 2 та 3 однаковими сходинками різної величини

Наукова новизна роботи полягає у пропозиції і підтвердженні ефективності використання трифазного вхідного впливу за завданням для покращення динамічної точності процесу регулювання.

Висновки. В результаті було побудовано модель системи регулювання з трифазним вхідним впливом за завданням. Результати моделювання показали, що використання трифазного впливу дозволяє отримати ще вищу динамічну точність порівняно з попередніми результатами. До недоліку слід віднести порівняно повільніший початок процесу регулювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ісаєв А.Б., Мірошниченко В.І., Койфман О.О., Сімкін О.І. Застосування двосхідчастого вхідного впливу для зменшення динамічного відхилення перехідного процесу за завданням у системах автоматизованого управління. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (48), 92–103. https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310687
2. Ісаєв А.Б. Поліпшення динамічної точності та швидкодії перехідного процесу за завданням при використанні вхідного впливу з двох сходинок. Тези доповеді. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 2. 368 p

РОЗДІЛ 6

МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 621.3:004.896

В.О. Книш[1], О.С. Бешта[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ СТАТИЧНОЇ МОДЕЛІ УНІВЕРСАЛЬНОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА ІЗ 5 СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ

Анотація. Представлено результати розробки статичної моделі для універсального робота-маніпулятора з 5 ступенями свободи Custom Robotic Kit (далі CuRoK). Розроблена модель забезпечує можливість системного дослідження електромеханічних характеристик робота, у тому числі як складової багаторівневої мехатронної системи.

***Ключові слова**: універсальний робот-маніпулятор, статична модель, ROS, робототехніка, мехатроніка.*

Вступ. Останніми роками спостерігається стале зростання попиту на універсальні роботи-маніпулятори [1]. У поєднанні зі стрімким поширенням технологій 3D-друку та ЧПК-виробництва спостерігається не лише збільшення загальної кількості роботів, а й розширення різноманіття їх конструкцій, форми та установ-виробників.

Водночас великі компанії-виробники часто зацікавлені у створенні власних закритих екосистем [2], що може ускладнювати процес взаємодії з цифровими моделями їхніх роботів. Менші ж підприємства нерідко взагалі не мають відповідного програмного забезпечення для моделювання та тестування.

З огляду на зазначені фактори, алгоритми побудови власних моделей роботів стають одним із найефективніших інструментів для їх тестування та програмування.

Постановка задачі. Метою роботи є побудувати статичну модель універсального робота-маніпулятора CuRoK з використанням Robot Operating System(далі ROS) для полегшення впровадження таких машин в більш складні моделі в програмному забезпеченні MATLAB Simulink шляхом врахування конструктивних особливостей, а саме момента інерції та геометричних пропорцій ланок.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- математично описати електромеханічні та фізичні характеристики ланок робота;

- побудувати Unified Robot Description Format (далі URDF) модель для подальшого імпортування в програмне забезпечення для тестування роботехнічного комплексу;
- створити файли візуалізації;
- зробити висновки щодо універсальності запропонованого рішення.

Основний зміст роботи. Під час роботи над даною роботою булі використані наступні методи та інструменти.

- ROS версії Noetic; VSCode версії 1.104.0; Blender версії 4.1.

CuRoK [3] – це універсальний, багатоцільовий, легкий, жорстко програмований електромеханічний робот-маніпулятор, що має п’ять ступенів свободи, приводи якого розташовані на виконавчих органах.

Кінематична будова робота-маніпулятора наведена на рис. 1, де O_i – точки з’єднання ланок.

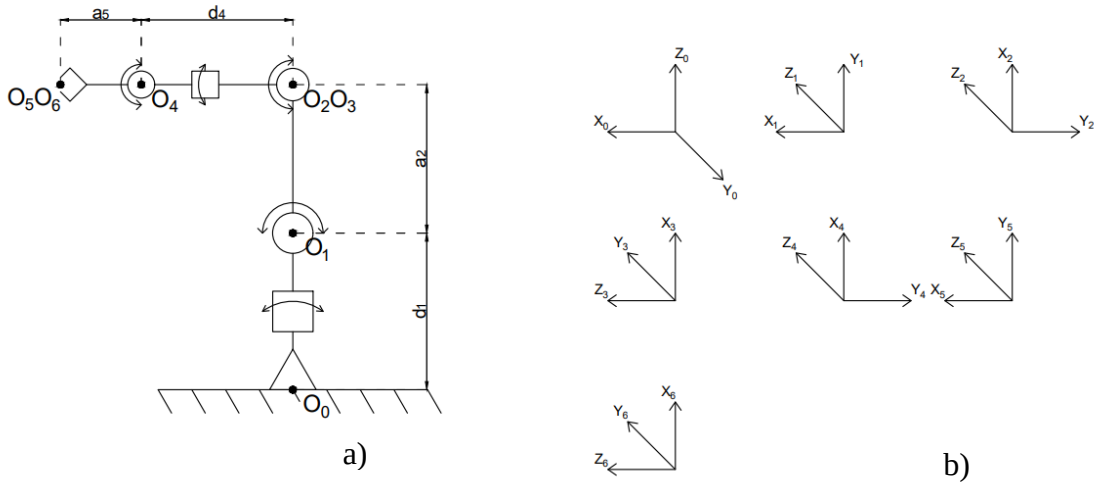


Рис. 1. Кінематична будова робота CuRoK a) схема робота; b) системи координат точок O_i

Таблиця 1

Параметри Денавіта-Хартенберга робота-маніпулятора

i	θ_i, рад	α_{i-1}, рад	a_{i-1}, мм	d_i, мм
1	θ_1	$\pi/2$	0	232
2	$\theta_2 + \pi/2$	0	220	0
3	θ_3	$\pi/2$	0	0
4	θ_4	$-\pi/2$	0	225
5	$\theta_5 - \pi/2$	0	130	0
6	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0

Кінематична будова робота-маніпулятора0.1 описана за допомогою параметрів Денавіта-Хартенберга (табл.1), де d_i – зміщення вздовж ланки i-1 осі z до загальної нормалі ланки i; θ_i – кут відносно осі z ланки i-1 від осі x ланки i-1

до нової осі x ланки i; a_{i-1} – довжина спільної нормалі. При обертовому з'єднанні, це радіус навколо осі z ланки i-1; α_{i-1} – кут до загальної нормалі, від осі z ланки i-1 до осі z ланки i.

Приводами робота-маніпулятора CuRoK виступають крокові двигуни. Максимальна кутова швидкість крокових електродвигунів визначається по формулі 1:

$$\omega_{дi} = \frac{V_{дi}}{L_{дi} \times 2 \times I_{дi}} \times \frac{2 \times \pi}{360°/SD} = \tag{1}$$

$$= \frac{\text{В}}{\text{Гн} \times 1 \times \text{А}} \times \frac{\text{рад}}{°/°} = \frac{\text{В} \times \text{А} \times \text{рад}}{\text{В} \times \text{с} \times \text{А}} = \text{рад}/c,$$

де $V_{дi}$ – робоча напруга крокового двигуна; $L_{дi}$ – фазна індуктивність крокового двигуна; $I_{дi}$ – максимальний фазний струм крокового двигуна; SD – градус зміщення валу крокового двигуна за один крок.

Робот-маніпулятор CuRoK має 5 ланок. Максимальний момент навантаження ланок визначається по формулі 2:

$$T_{i.max} = T_{дi} \times N \times i_i = \text{Нм} \times 1 \times 1 = \text{Нм}, \tag{2}$$

де $T_{дi}$ – момент двигуна; N – кількість двигунів; i – передавальне число, що визначається за формулою 3 для пасової передачі та дорівнює 1 для муфти.

$$i_i = \frac{z_i}{z_{\text{шків}}} \tag{3}$$

де z_i – число зубів ланки; $z_{\text{шків}}$ – число зубів шківу

Маса ланки може бути розрахована по формулі 4:

$$M_i = k_з \times \sum V_i \times (\rho \times kf_i) + M_{дi} \times N = \tag{4}$$

$$= 1 \times \sum \text{м}^3 \times (\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 1) + \text{кг} \times 1 = \text{кг},$$

де $k_з$ – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1.1; V_i – об’єм конструктивного елемента ланки; ρ – густина матеріалу ланки. Для PETG ρ =1270 кг/м3; kf_i – коефіцієнт заповнення конструктивного елементу ланки; $M_{дi}$ – маса встановленого на ланці двигуна.

Для спрощення проведення розрахунків моменту інерції ланок робота-маніпулятора, їх форма була апроксимована до простих геометричних фігур. Візуалізація результатів апроксимації наведені на рис.2.

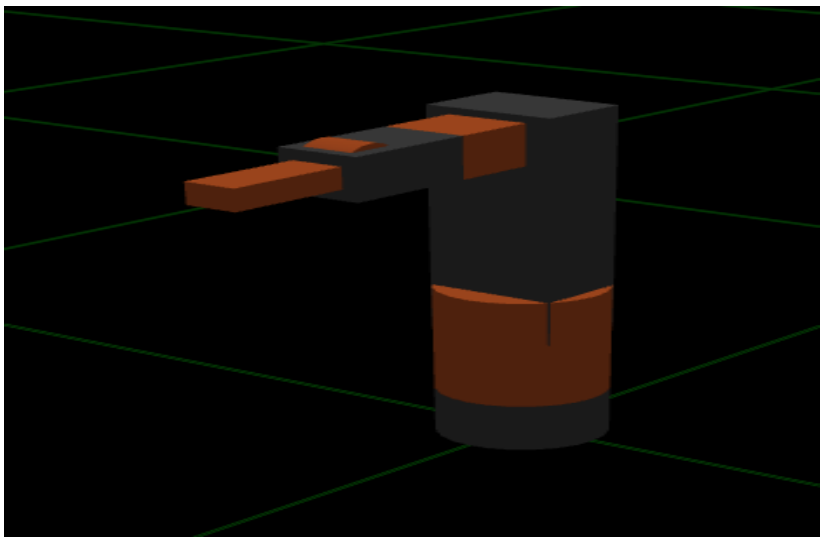


Рис. 2. Візуалізація апроксимації ланок

В залежності від обраної фігури, формула моменту інерції приймає наступний вигляд:

Суцільний циліндр радіусу *r*, висоти *h* і маси *m*(формули 5 та 6):

$$J_{xi} = J_{yi} = \frac{1}{12} \times m \times (3r^2 + h^2) = \text{кг} \times (\text{м}^2 + \text{м}^2) = \text{кг} \times \text{м}^2 \quad (5)$$

$$J_{zi} = \frac{mr^2}{2} = \text{кг} \times \text{м}^2 \quad (6)$$

Суцільний кубоїд висоти *h*, ширини *w*, довжини *l*, маси *m* (формули 7, 8 та 9):

$$J_{xi} = \frac{m}{12} \times (w^2 + h^2) = \text{кг} \times (\text{м}^2 + \text{м}^2) = \text{кг} \times \text{м}^2 \quad (7)$$

$$J_{yi} = \frac{m}{12} \times (h^2 + l^2) = \text{кг} \times (\text{м}^2 + \text{м}^2) = \text{кг} \times \text{м}^2 \quad (8)$$

$$J_{zi} = \frac{m}{12} \times (w^2 + l^2) = \text{кг} \times (\text{м}^2 + \text{м}^2) = \text{кг} \times \text{м}^2 \quad (9)$$

На основі кінематичних даних (рис. 1, табл. 1) та результатів розрахунків було побудовано URDF-модель робота-маніпулятора CuRoK у середовищі ROS з використанням VS Code. Модель містить опис кінематичної структури та фізичних параметрів робота. Файли візуалізації створено за допомогою програмного забезпечення Blender.

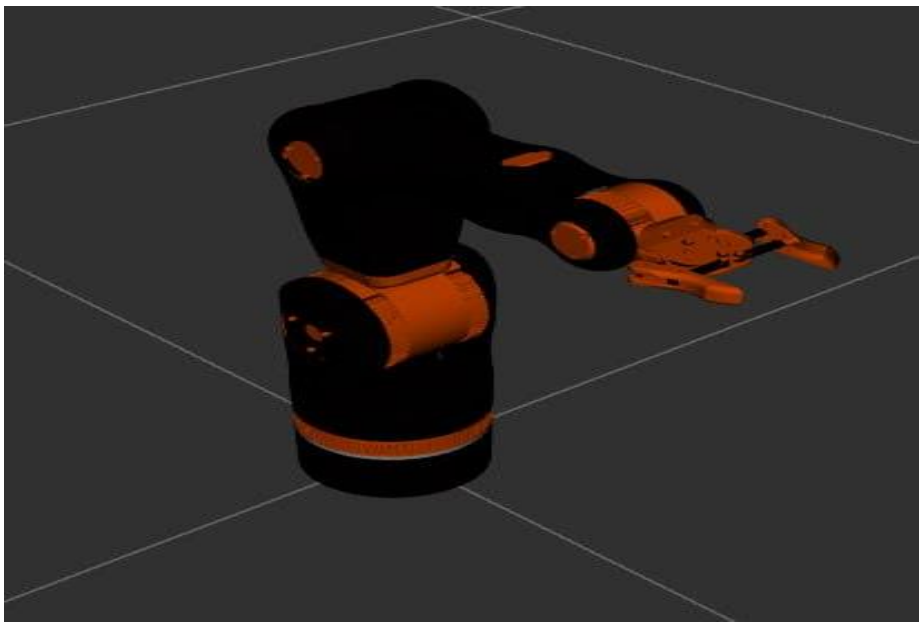


Рис. 3. Візуалізація URDF моделі засобами ROS

Наукова новизна: дістали подальшого розвитку методи побудови моделей універсальних роботів-маніпуляторів для програмного забезпечення MATLAB Simulink, що дозволяє враховувати конструктивні особливості, а саме момент інерції та геометричні пропорції ланок, і розкриває нові можливості для полегшення процесу впровадження робота в багаторівневі мехатронні системи.

Висновки. У роботі реалізовано повний цикл побудови статичної моделі робота-маніпулятора CuRoK, від математичного опису ланок до візуалізації URDF-моделі. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого алгоритму для створення універсальних моделей роботів і їх придатність для використання в середовищі ROS та подальшому впровадженні в більш складні моделі багаторівневих мехатронних систем в програмному забезпеченні MATLAB Simulink.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Global Robot Demand in Factories Doubles Over 10 Years. URL: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-demand-in-factories-doubles-over-10-years (дата звернення: 10.11.2025).
2. Westover, Jonathan. (2025). Building Open or Closed Ecosystems: A Question of Organizational Strategy and Leadership. Human Capital Leadership Review. 23. 10.70175/hclreview.2020.23.4.5.
3. Shykhov, S., Knysh, V., and Plahunov, O. "Development Of A Mobile Platform With A Manipulator Robot". *Annals of the University of Petrosani Electrical Engineering* 26 (2024). P 115-122.
4. ROS Wiki. URDF. URL: https://wiki.ros.org/urdf (дата звернення: 10.11.2025).

УДК 681.516:621.865.8

С.С. Худолій[1], О.А. Яланський[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СТАНДАРТУ IEC 61131 ДЛЯ ЦИКЛОВОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ДЛЯ РІЗНИХ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ ВИКОНАВЧОГО ПРИСТРОЮ НА ПРИКЛАДІ МАНІПУЛЯТОРА ПНЕВМОРОБОТА

Анотація. Виконаний аналіз особливостей застосування інструментарію окремих мов програмування програмованих логічних контролерів (ПЛК) для реалізації різних видів траєкторії руху ВП маніпулятора пневморобота з моделюванням відпрацювання в програмному симуляторі пневматичних, гідравлічних та електричних схем FluidSim. Подана класифікація можливих траєкторій, виявлені їх особливості з точки зору алгоритмізації циклового керування. Сформульовані рекомендації для інженерів та викладачів закладів технічної освіти.

***Ключові слова**: мови програмування ПЛК, пневматичний маніпулятор, пневмопривод, виконавчий пристрій, циклове керування, формалізація, алгоритмізація, керування електроклапанами, моделювання пневмосхем, FluidSIM.*

Вступ. Роль механізмів з обмеженою кількістю ступенів свободи (незалежних рухів), які працюють циклічно, в сучасному промисловому виробництві не зменшується. Можна вважати, що поки виробництво і технології зберігаються в звичному класичному вигляді, такі механізми будуть широко застосовуватися, і такі сучасні тенденції, як роботизація з використанням мобільних роботів, софт-роботів, коботів, автоматизація та застосування штучного інтелекту (ШІ), не призведуть до витіснення класичних циклічних механізмів (які, по суті, є загальнопромисловими).

Акцентуємо увагу, що йдеться про механізми, для яких характерні такі риси:

– обмежена і невелика кількість ступенів свободи (від однієї до 3…5);

– окремі ланки механізму, як правило, виконують дискретні зворотно-поступальні та обмежені по куту обертові рухи; можливе також неперервне або дискретне обертання в одному напрямку для окремих ланок;

– механізм працює «до упору», тобто рух механізму та окремих ланок відбувається до механічного обмежувача (до моменту упору), коли подальший рух вже неможливий навіть за прикладеної сили привода; в точках упору можливе встановлення амортизаторів удару;

– механізм періодично повертається в початковий стан, після чого послідовність рухів повторюється без змін або із змінами, які також чергуються;

– це переважно універсальні загальнопромислові механізми.

Для таких механізмів переважно використовується циклове керування, причому в промисловому виробництві в якості керуючих пристроїв найчастіше

застосовуються ПЛК; в робототехніці, мехатроніці, на транспорті можуть використовуватись як ПЛК, так і інші типи мікропроцесорних пристроїв, зокрема одноплатні міні-комп'ютери різного конструктивного виконання. До таких механізмів відноситься і пневматичний маніпулятор робота МП-9с.

Мета роботи: розробити методичні рекомендації для інженерів та викладачів закладів технічної освіти щодо формалізації та алгоритмізації задач циклового керування загальнопромисловими механізмами циклічної дії.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- виконати класифікацію можливих траєкторій захоплювача (виконавчого пристрою, ВП) маніпулятора, виявити їх особливості; сформулювати лінгвістичні правила у форматі «якщо <*опис відповідає критеріям*>, то <*висновок або опис дії*>» для подальшої алгоритмізації в форматі логічного виразу «якщо <*умова*>, то <*вираз*>».
- проаналізувати типи керуючих та виконавчих пристроїв (ВП), види сигналів керування та зворотного зв'язку;
- розробити рекомендації щодо алгоритмізації задачі керування для різних типів траєкторій та різних мов програмування;
- розробити модель пневматичної частини маніпулятора;
- розробити програми для керування рухом маніпулятора, відповідні моделі для FluidSIM, спроектувати взаємодію моделлю програмної (електричної частини) та пневматичною моделлю; виконати моделювання системи, проаналізувати результати моделювання;
- зробити висновки щодо коректності рекомендацій та доцільності використання результатів роботи в навчальному процесі закладів технічної освіти.

Основний зміст роботи. Під час роботи над даною роботою булі використані наступні методи та інструменти.

- аналіз особливостей кінематичної схеми робота та робочої зони маніпулятора; візуальний аналіз просторових траєкторій руху ВП маніпулятора;
- методи лінгвістичної обробки правил: аналіз та виявлення закономірностей, формулювання правил, застосування правил;
- математична модель циклового керування; діаграми переходів між станами; програмні моделі пневматичних та електричних схем;
- програмна оболонка для моделювання пневматичних, гідравлічних та електричних схем FluidSIM (інструменти: Pneumatics, Electrical engineering).

Як було зазначено, в роботі розглянуто керування маніпулятором промислового пневморобота, що є частковим випадком циклового керування. Проте надані рекомендації та інші результати можуть бути розповсюджені на інші задачі керування машинами та механізмами циклічної дії інших типів.

Кінематична схема маніпулятора стандартна, дозволяє рух за трьома ступенями свободи за напрямками «Вперед» (Forward) – «Назад» (Back), «Вгору» (Up) – «Вниз» (Down) (обмежений рух уздовж відрізка прямої лінії) та «Вправо» (Right) – «Вліво» (Left), (обмежений обертовий рух навколо вертикальної вісі уздовж дуги кола довжиною до 120°). Робочою зоною є просторова фігура, яка обмежена:

- згори та знизу двома паралельними площинами, що відстоять одна від одної на відстані, яка дорівнює висоті підйому ВП;
- справа та зліва – двома паралельними площинами, які перетинаються одна з одною вертикальною прямою, що співпадає з віссю повороту руки маніпулятора; кут між площинами дорівнює куту повороту ВП;
- спереду та позаду – двома циліндричними поверхнями з осями, що співпадають з віссю повороту маніпулятора; різниця радіусів циліндрів дорівнює відстані висування ВП.

Зазвичай ВП рухається вздовж одного ступеня рухомості від одного упора до протилежного, при цьому положення за двома іншими ступенями свободи зафіксоване. Таким чином рух здійснюється вздовж одного ребра робочої зони.

В рамках дослідження побудовані варіанти можливих траєкторій руху ВП в заданій робочій зоні. Виявлені та класифіковані траєкторії, які переважно використовуються в роботі в реальних умовах промислового виробництва та траєкторії, які цікаві з точки зору методології циклового керування. Зокрема, до них відносяться (рис. 1):

- лінійна (нерозгалужена) замкнута циклічна траєкторія на 6 точок кінцевого позиціонування, рис. 1, а (усього існує 32 варіанти таких траєкторій);
- лінійна (нерозгалужена) замкнута циклічна траєкторія на 8 точок позиціонування, рис. 1, б (12 варіантів);
- лінійна незамкнута циклічна із зворотно-поступальним рухом на 5 точок позиціонування, рис. 1, в (32 варіанти);
- розгалужена замкнута циклічна траєкторія на 6(+1) точок позиціонування з одним альтернативним взаємовиключним розділенням, рис. 1, г (12 варіантів);

Існують інші можливі варіанти траєкторій в межах робочої зони але: деякі з них не є предметом інтересу з методологічної точки зору, оскільки вони є екстенсивним ускладненням наведених траєкторій без принципової зміни підходів до керування; не мають практичної цінності для застосування в промисловому виробництві; деякі траєкторії слід аналізувати додатково і не розглянуті в рамках цієї роботи.

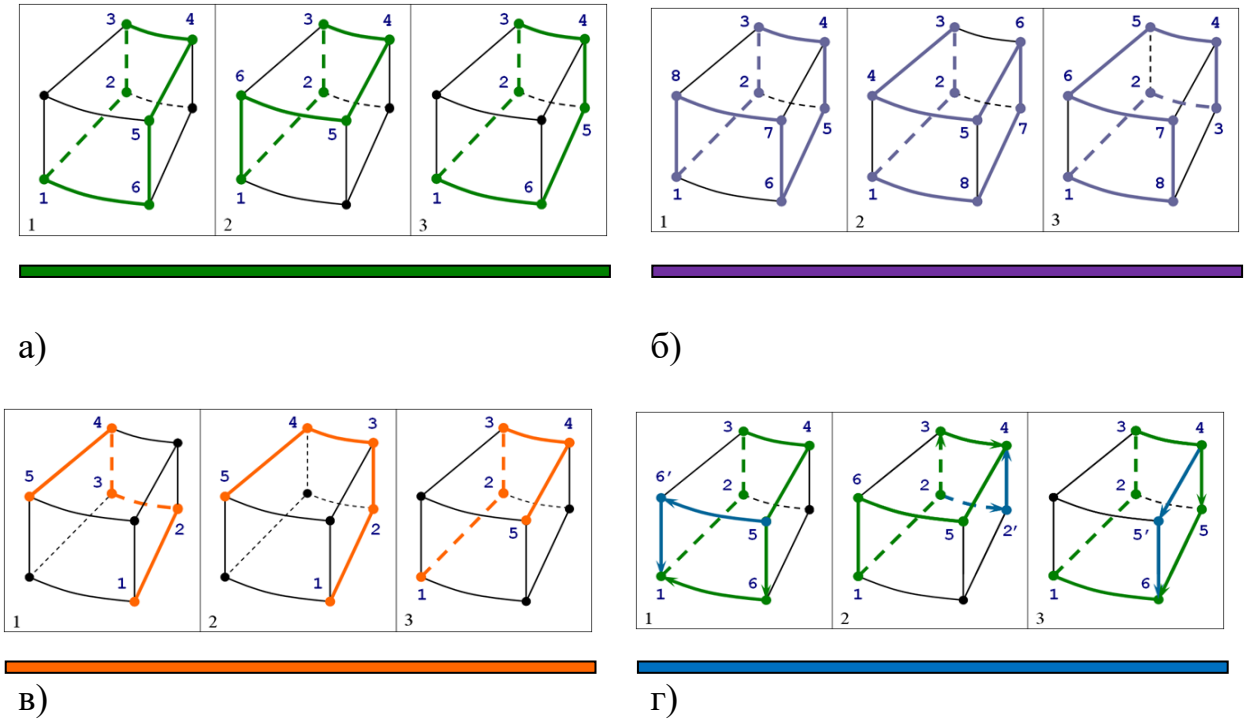


Рис. 1. Види та приклади траєкторій руху ВП маніпулятора: а) лінійна циклічна на 6 точок позиціонування; б) лінійна циклічна на 8 точок; в) лінійна із зворотно-поступальним рухом; г) циклічна з розгалуженням

Розглянемо перший вид траєкторій (рис. 1, а). Вони мають такі особливості (окрім тих, що вже вказані в назві):

- кожен напрям руху за будь-яким ступенем свободи в межах одного циклу зустрічається (виконується) лише один раз (наприклад, рух за напрямом «Вперед» в траєкторії на рис. 1, а, (1) виконується тільки при переміщенні з т. 1 до т. 2, а рух за напрямом «Вгору» – лише з т. 2 до т. 3);
- усі точки позиціонування в траєкторії розташовуються відокремлено у просторі, але рівнозначні між собою за іншими ознаками, тобто не відрізняються з точки зору підходу до керування рухом від цієї точки до наступної і з точки зору функції контролю досягнення цієї точки ВП-єм; виключенням є лише перша точка при запуску руху в першому циклі.

З урахуванням цих особливостей траєкторій, а також з урахуванням дискретного бінарного типу обладнання (датчиків положення, електроклапанів та виконавчих циліндрів) можна скласти прескриптивні лінгвістичні правила керування, які надалі перетворюються на логічні функції та алгоритми керування. Наразі для траєкторії першого виду:

- правило 1: «Якщо ВП досяг певної точки позиціонування, виконати дії для запуску руху до наступної точки траєкторії»;
- правило 2: «Для запуску руху до певної точки траєкторії необхідно встановити в активний стан логічну змінну, що керує електроклапаном

цього напряму, та скинути в нуль логічну змінну керування за протилежним напрямом»;

- правило 3: «Подію встановлення ВП в першу точку траєкторії в першому робочому циклі при першому запуску або при перезапуску робота необхідно контролювати по факту спрацьовування (встановлення відповідних сигналів зворотного зв'язку) трьох датчиків положення відповідних напрямів за трьома різними ступенями свободи за схемою логічного множення»;
- правило 4: «Настання події досягнення ВП-єм певної точки позиціонування достатньо контролювати за умовою спрацьовування (встановлення сигналу зворотного зв'язку) датчика за напрямом поточного руху, який виконується по нефіксованому ступеню свободи».

Перше правило надає можливість забезпечити керування з урахуванням поточного стану обладнання за зворотними зв'язками, тобто забезпечити найшвидше можливе відпрацювання траєкторії без використання керування за часом (без використання таймерів). Друге правило забезпечує коректне керування електроклапанами і виключає ситуації, коли обидві напівпорожнини виконавчих циліндрів приєднуються одночасно або до магістралі стисненого повітря, або до атмосфери. Третє правило обумовлює необхідні керуючі дії для першого запуску робота. Правило 4 дозволяє спростити керуючу програму, що забезпечує відповідність нормативним критеріям лаконічності, зокрема критерію LOC (Lines of Code) та критерію меншої цикломатичної складності (Cyclomatic Complexity), який вважається важливою метрикою саме в практичній промисловій розробці.

Для траєкторії другого виду (рис. 1, б) встановлені особливості (наведені лише ті, які відмінні від вище зазначених для траєкторій першого виду):

- деякі (але не всі) напрями руху зустрічаються (виконуються) двічі (наприклад, рух за напрямом «Вгору» в траєкторії на рис. 1, б, (1) виконується при переміщенні з т. 2 до т. 3, а також від т, 6 до т. 7), в той час як інші здійснюються лише один раз за один цикл (наприклад, рух «Вперед» – лише з т. 1 до т. 2); цим обумовлена наступна особливість:
- точки позиціонування в траєкторії не рівнозначні між собою з точки зору підходу до керування рухом від цієї точки до наступної і з точки зору функції контролю досягнення цієї точки ВП-єм, і поділяються на дві групи; перша точка першого запуску також є виключенням.

Отже, для такого виду траєкторій можна скласти прескриптивні лінгвістичні правила керування (наведені лише відмінні від вище зазначених):

- правила 1, 2 та 3 дійсні;
- правило 4: «Настання події досягнення ВП-єм певної точки позиціонування слід контролювати за умовою з накопиченням станів спрацьовування (встановлення трьох сигналів зворотного зв'язку за схемою логічного множення) датчика за напрямом поточного руху, який

виконується по нефіксованому ступеню свободи, та двох датчиків положення за фіксованими ступенями свободи».

Траєкторії третього виду (рис. 1, в) є типовими для маніпуляторів з трьома ступенями свободи пневматичних роботів із зазначеною геометрією робочої зони і застосовуються, зазвичай, для зняття заготовки з конвеєра та розміщення її в робочу зону штампувального автомата або до патрона металорізального верстата з обходом можливих нерухомих перепон. Також такі траєкторії дозволяють вилучати готову деталь або оброблену заготовку і передавати її далі по виробничій лінії.

Особливості траєкторій третього та четвертого видів та лінгвістичні правила для них не наводяться через обмежений обсяг друкованого матеріалу. Також виконаний аналіз особливостей реалізації траєкторій різними мовами програмування з використанням різних типів даних.

Проведений аналіз та розв'язання конкретних задач з програмування дозволяють сформулювати такі методичні рекомендації. Замкнуті лінійні траєкторії (рис. 1, а, б) доцільно програмувати мовою релейних схем або сходових діаграм (Ladder Diagram, LD). При цьому утілюємо розглянутий вище принцип керування: а) за допомогою одного або трьох герконів визначаємо поточне положення захоплювача; б) в залежності від визначеного поточного положення захоплювача вмикаємо електроклапани виконавчих пневмоциліндрів для руху в наступну точку траєкторії. Розімкнуті траєкторії із зворотно-поступальним рухом (рис. 1, в) можна реалізувати кількома способами, один з найзручніших з яких – використання барабанного кулачкового контролера в програмі мовою функціональних блоків (Functional Block Diagram, FBD). Для реалізації розгалужених траєкторій (рис. 1, г) доцільно використовувати мову Grafcet. При цьому кожній точці траєкторії відповідає певний стан обладнання, а рух за траєкторією задається діаграмою переходів між станами.

На рис. 2 наведені часові діаграми роботи моделі пневматичної схеми робота під керуванням електричної схеми, яка є апаратним еквівалентом алгоритму роботи з опитуванням трьох послідовно з'єднаних датчиків (схема логічного множення) для встановлення тригера напрямку подальшого руху із скиданням тригера протилежного напрямку.

На рисунку в полі зліва (в першому стовпчику таблиці) наведене умовне позначення елемента, стан якого відображається праворуч), зокрема це: виконавчий пневмоциліндр подвійної (двосторонньої) дії лінійного руху з магнітними датчиками, виконавчий поворотний пневмоциліндр подвійної дії з датчиками, 3/2-ходовий нормально закритий електромагнітний клапан. В наступному полі (друга колонка) наведені напрями руху у відповідності до раніше прийнятої системи позначень, координати уздовж відповідних осей, позначення котушок електроклапанів та логічні значення можливих їх можливих станів.

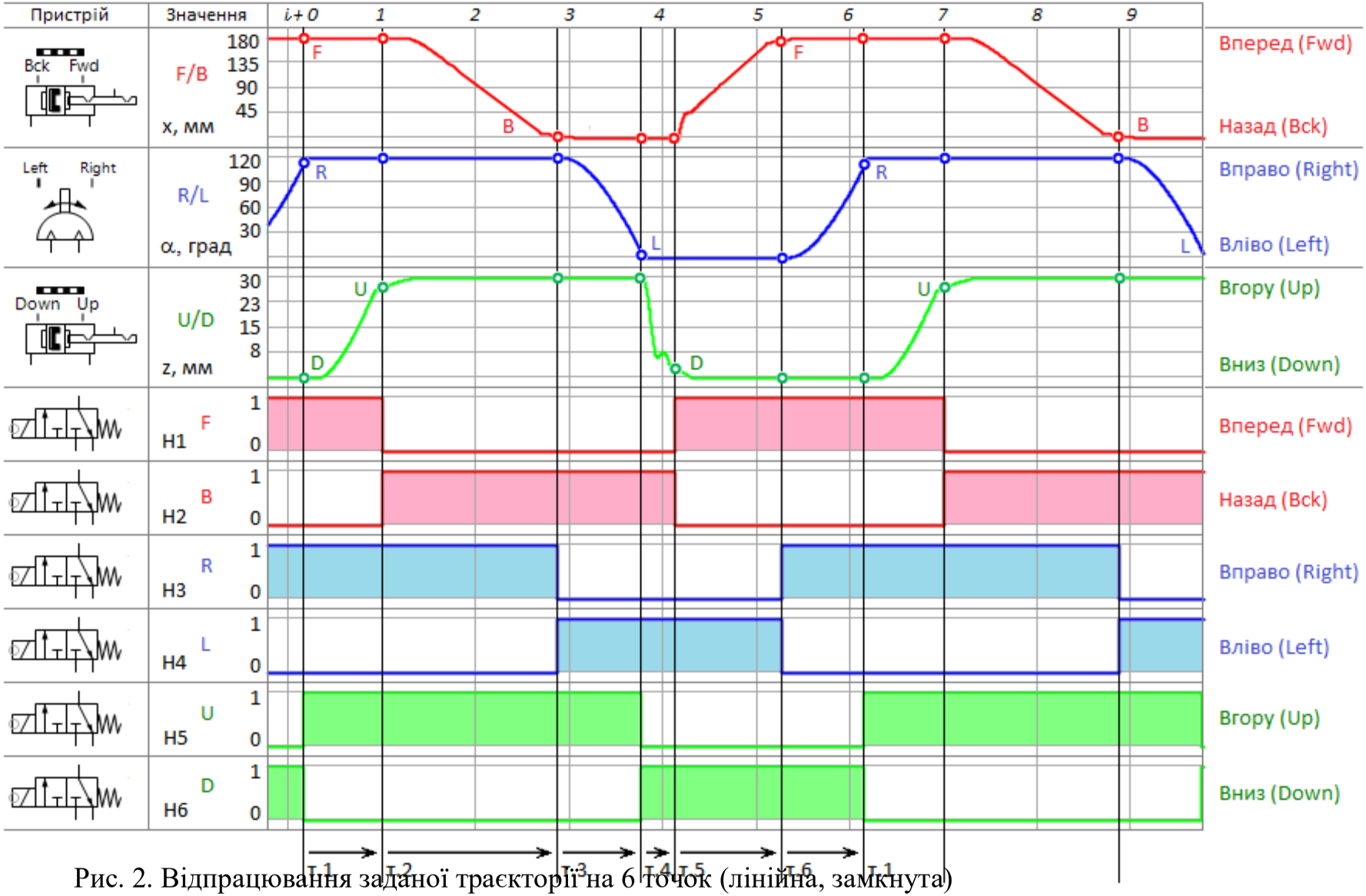


Рис. 2. Відпрацювання заданої траєкторії на 6 точок (лінійна, замкнута)

Перші три графіка відображають зміну поточних координат ВП маніпулятора за напрямками «Вперед/Назад», «Вправо/Вліво» та «Вгору/Вниз». Наступні шість осцилограм показують поточні стани відповідних електроклапанів. Знизу під графіками стрілками показані переходи ВП маніпулятора від точки до точки за заданою тестовою траєкторією.

Результати моделювання підтверджують відсутність логічних помилок в алгоритмі керування та керуючій програмі, зокрема максимально швидке відпрацювання траєкторії за заданих параметрів пневматичного привода та інерційності мас, що рухаються.

Результати моделювання співпадають з результатами лабораторного експерименту, що виконаний в навчальній лабораторії кафедри електропривода Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Результати роботи частково увійшли до методичних вказівок для навчального процесу, які рекомендовані кафедрою до подання до Науково-методичної комісії університету за спеціальністю.

Наукова новизна роботи полягає в подальшому розвитку методології розробки систем циклового програмного керування машинами та механізмами, зокрема розробляється лінгвістично-орієнтований підхід до формалізації та алгоритмізації задачі керування, що може бути корисним для реалізації програмування ПЛК за допомогою штучного інтелекту.

Висновки. Сформульовані методичні рекомендації для інженерів та викладачів закладів технічної освіти щодо формалізації та алгоритмізації задач циклового керування механізмами циклічної дії в залежності від просторової траєкторії та мови програмування із дотриманням прескриптивних (нормативних) правил на прикладі керування пневматичним маніпулятором промислового робота.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. С.С. Худолій Застосування сучасних дидактичних систем у процесі підготовки фахівців з мехатроніки та робототехніки. // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 101 – С.65-68
2. Nazarova, O. Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator / V. Osadchyy, T. Hutsol, Sz. Glowacki, T. Nurek, V. Hulevskyi, I. Horetska // Scientific Reports, 2024. – Vol. 14. – P. 6970. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4.

УДК 621.31:681.5:004.94:004.89

Ю. Ю. Шрамко[1], С.В. Іванчишина[1]
[1]Технічний університет «Метінвест Політехніка», Запоріжжя, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Анотація. У статті розглянуто підходи до створення системи контролю технічного стану промислових електроприводів на основі цифрового двійника, побудованого на математичній моделі асининхронного двигуна в координатах d–q. Показано можливість поєднання електромагнітної, теплової та вібраційної підсистем у єдиній структурі цифрового двійника для оцінки параметрів приводу в режимі, близькому до реального часу. Обґрунтовано вибір частоти оновлення даних 10–50 мс з урахуванням затримок у сенсорних каналах та обчислювальних процесах. Сформовано контур діагностики, що поєднує модельні дані та експериментальні сигнали з використанням методів спектрального аналізу та машинного навчання. Запропонований підхід може бути використаний для прогнозного контролю та підвищення надійності промислових електроприводів.

Ключові слова: *цифровий двійник, електропривод, dq-модель, діагностика, прогнозне технічне обслуговування, вібраційний аналіз, теплова модель*

Вступ. Сучасна промислова енергетика перебуває у фазі глибокої цифрової трансформації, що зумовлює інтеграцію технологій *Industrial Internet of Things (IIoT)*, штучного інтелекту та цифрових двійників у системи керування електротехнічними комплексами [1, 2].

Особливо актуальним є застосування таких технологій у системах електроприводів, які забезпечують до 60–70 % споживання електроенергії на промислових підприємствах.

Електроприводи виконують ключові функції у виробничих процесах металургії, гірничодобувної, хімічної та енергетичної галузей, а тому оптимізація їхньої роботи має значний вплив на загальну енергоефективність виробництва.

Традиційні системи керування електроприводами, навіть оснащені частотними перетворювачами, не забезпечують повного контролю технічного стану обладнання в реальному часі [3].

Відсутність механізмів прогнозування та аналітичної оцінки стану призводить до невиправданих зупинок, підвищених енергетичних втрат і скорочення ресурсу машин.

Упровадження цифрових двійників дає змогу реалізувати принципи *Predictive Maintenance* – прогнозного технічного обслуговування, при якому рішення базуються на аналізі цифрової копії фізичного об'єкта, що відтворює дефекти [4].

Цифровий двійник електропривода – це інтегрована модель, що поєднує математичний опис електромеханічних процесів, теплових і вібраційних характеристик із потоками експериментальних даних від датчиків струму, напруги, температури та прискорення [3].

Завдяки такій взаємодії створюється єдиний інформаційний простір між фізичним і віртуальним рівнями системи керування, який дозволяє аналізувати, прогнозувати й оптимізувати режими роботи електромеханічних комплексів.

Проблематика побудови ефективного цифрового двійника електропривода полягає у виборі адекватної математичної моделі, яка забезпечує компроміс між точністю відтворення процесів і можливістю функціонування в реальному часі.

Крім того, важливими є питання розроблення контурів діагностики з мінімальною затримкою обробки сигналів, а також інтеграції моделей різної фізичної природи (електромагнітної, теплової, механічної) у єдине програмне середовище.

Отже, актуальним завданням є створення цифрового двійника, здатного забезпечити інтеграцію фізичних та аналітичних моделей у режимі реального часу

Постановка задачі. Незважаючи на значний прогрес у розвитку систем автоматизованого керування електроприводами, актуальним залишається питання створення уніфікованої моделі цифрового двійника, здатної забезпечувати одночасно високу точність відтворення процесів, стабільність обчислень і можливість реалізації у режимі реального часу.

Складність завдання полягає у необхідності поєднання різнорідних фізичних процесів – електромагнітних, механічних, теплових та вібраційних — у межах єдиної математичної структури, що потребує балансування між обсягом обчислень і затримками сигналів.

Метою роботи є розроблення узагальненої архітектури цифрового двійника електропривода промислового об’єкта та обґрунтування вибору математичної моделі, придатної для використання в системах реального часу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз існуючих математичних моделей асинхронного двигуна та визначити критерії їхньої придатності для моделювання у режимі онлайн;
- розробити структурну схему цифрового двійника з урахуванням інформаційних потоків між фізичним, віртуальним і аналітичним рівнями;
- сформувати контур діагностики та визначити часові характеристики його функціонування;
- провести аналіз чутливості моделі до зміни параметрів і нестаціонарних режимів;
- оцінити потенційні переваги застосування цифрових двійників у системах керування електроприводами.

Виконання зазначених завдань дозволить сформувати комплексну основу для побудови цифрового двійника електропривода.

Основний зміст роботи.

Класифікація математичних моделей електроприводів.

Математичні моделі електроприводів класифікуються за рівнем деталізації, фізичним змістом і цільовим призначенням. Залежно від мети моделювання, виділяють такі основні типи табл.1

Таблиця 1

Порівняльна характеристика математичних моделей асинхронного двигуна

Тип моделі	Основні рівняння	Переваги	Недоліки
Трифазна (abc)	диференціальні рівняння у фазній системі координат	висока точність, відображення несиметрії фаз і гармонік	значна обчислювальна складність, повільна
Векторна (dq)	рівняння у синхронній обертовій системі координат	придатна для керування типу FOC, висока швидкодія	потребує перетворення координат, втрачено частину гармонік
Grey-box (ідентифікаційна)	параметри отримані шляхом статистичної ідентифікації	проста реалізація, універсальність	знижена фізична інтерпретованість
Польова (FEM)	рівняння поля, розв'язок методом скінченних елементів	висока точність, моделює насичення	непридатна для роботи у реальному часі
Теплова RC	еквівалентна RC-мережа теплообміну	дозволяє прогнозувати перегрів	не описує електромагнітну динаміку

Аналіз показує, що векторна dq-модель є найбільш придатною для реалізації у реальному часі, оскільки забезпечує баланс між точністю й обчислювальною ефективністю [5-7].

Саме вона лежить в основі сучасних алгоритмів керування електроприводами типу *Field Oriented Control (FOC),* реалізованих у промислових частотних перетворювачах.

Математичний опис d q-моделі асинхронного двигуна.

Векторна модель базується на перетвореннях Кларка–Парка, які переводять трифазну систему у дві ортогональні складові, орієнтовані за магнітним потоком ротора [5, 7]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120°) & \cos(\theta + 120°) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120°) & -\sin(\theta + 120°) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Основна система рівнянь асинхронного двигуна у координатах (d-q) має вигляд [8, 9]:

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = \frac{L_m i_d - \psi_{dr}}{T_r} + \omega_r \psi_{qr},$$
$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = \frac{L_m i_q - \psi_{qr}}{T_r} - \omega_r \psi_{dr},$$
$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs},$$
$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds},$$
$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \left(\psi_{dr} i_q - \psi_{qr} i_d\right),$$
$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M_e - M_L - B\omega_r.$$

де i_d, i_q – струми статора у системі координат (d-q);

ψ_{dr}, ψ_{qr} – потокозчеплення ротора;

ω_s, ω_r – частота обертання поля статора та ротора;

$\mathrm{R_s}, \mathrm{R_r}, \mathrm{L_s}, \mathrm{L_r}, \mathrm{L_m}$, – параметри схеми заміщення.

$\boldsymbol{J}$ – момент інерції ротора;

M_e – електромагнітний момент двигуна;

M_L – момент навантаження;

$B\omega_r$ – момент опору, що пропорційний швидкості обертання ротора, враховує втрати механічної енергії.

Перевагою цієї моделі є можливість відокремлення контурів регулювання потоку і моменту, що забезпечує стабільну роботу системи при зміні навантаження.

У аналітичних моделях діагностики зміна $\boldsymbol{B}$ може сигналізувати про підвищення опору в підшипниках або дефект балансування ротора.

У тепловій моделі частина втрат $B\omega_r^2$ може бути переведена у тепло $P_{\text{тертя}}$.

Урахування зовнішніх впливів та нестаціонарних процесів.

Для забезпечення адекватності моделі в реальних умовах у dq-модель вводяться допоміжні підсистеми:

Теплова підсистема:

$$R_s(T) = R_{s0}[1 + \alpha(T - T_0)],$$

де $\alpha = 0{,}0039 \sim 1/°C$; ця залежність дозволяє врахувати зміну опору обмоток при нагріванні.

Вібраційні впливи: аналізуються через частотне представлення сигналу прискорення $a(t)$ [10]:

$$A(f) = \left| \int a(t) e^{-j2\pi f t}\, dt \right|,$$

що дозволяє виявляти гармоніки, пов'язані з дефектами підшипників і дисбалансом ротора.

Мережеві спотворення: ураховуються шляхом додавання гармонік у вираз для вхідних напруг [11, 12]:

$$u_a = U_m \sin(\omega t) + \sum_{n=3,5,7} U_n \sin(n\omega t + \phi_n),$$

де гармоніки n=3,5,7n = 3, 5, 7n=3,5,7 відображають неідеальність мережі.

Отримані рівняння дозволяють моделювати динаміку потокозчеплень, моменту та швидкості, що робить dq-модель базовим ядром цифрового двійника.

Узагальнена архітектура цифрового двійника. Архітектура цифрового двійника електропривода є багаторівневою системою, що забезпечує обмін даними між фізичним об'єктом, математичною моделлю та аналітичними алгоритмами у реальному часі [13].

Основна мета такої архітектури – створення єдиного інформаційного простору для моніторингу, прогнозування та оптимізації роботи електромеханічних комплексів.

Схема узагальненої архітектури наведена на рис. 1.

Запропонована архітектура забезпечує інтеграцію між фізичним, віртуальним та аналітичним рівнями, формуючи основу для побудови систем моніторингу та прогнозного керування.

Характеристика рівнів системи

1. Фізичний рівень.

Включає реальні технічні засоби – електродвигун, перетворювач частоти, датчики струму, напруги, температури, вібрацій та контролер (ПЛК).

Основна функція – вимірювання параметрів у реальному часі й передача їх до віртуального рівня через промислові протоколи (*Modbus TCP, PROFINET, IO-Link*) [14].

Тут формується первинний потік даних $\mathrm{i_a}, \mathrm{i_b}, \mathrm{i_c}, \mathrm{U_{ab}}, \omega_\mathrm{r}, \mathrm{T}, \mathrm{a(t)}$.

2. Віртуальний рівень (модель цифрового двійника.

Представляє собою математичну копію електропривода, побудовану на основі dq-моделі асинхронного двигуна з урахуванням теплових і механічних підсистем.

Рис. 1. Узагальнена архітектура цифрового двійника електропривода

Цей рівень виконує:

- чисельну інтеграцію рівнянь (оцінка потокозчеплень, моменту, швидкості);
- симуляцію електромеханічних процесів;
- адаптацію параметрів у реальному часі за виміряними даними.
- Модель працює з частотою оновлення 10–50 мс, що дозволяє виявляти короткочасні відхилення параметрів.

Одним із критичних параметрів побудови цифрового двійника є вибір частоти оновлення даних ($f_s = 1/T_s$), що визначає здатність системи коректно відтворювати короткочасні відхилення електромеханічних параметрів.

Інтервал оновлення 10–50 мс вважається оптимальним для цифрового двійника електропривода, оскільки забезпечує баланс між точністю, швидкодією та навантаженням на обчислювальні ресурси.

Динамічні властивості електропривода. Асинхронний двигун є системою з різними часовими сталими, що визначають швидкість змін процесів табл.2.

Таблиця 2

Основні підсистеми цифрового двійника та їхні часові параметри

Підсистема	**Характерна часова стала, с**	**Тип процесу**
Електромагнітна	0,01–0,05	зміна потоків і струмів ротора
Механічна	0,1–1,0	зміна швидкості та моменту
Теплова	10–300	зміна температури обмоток і корпусу
Вібраційна	0,002–0,02	короткочасні коливання та удари

Таким чином, найшвидші зміни у струмах і потоках мають період близько **10–20 мс**, тоді як механічні процеси – на порядок повільніші.

Це дозволяє цифровому двійнику працювати з частотою 20–100 Гц без втрати суттєвої інформації.

Критерій Найквіста–Шеннона. Для відтворення сигналу без спотворень частота вибірки повинна задовольняти умову:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\max},$$

де $f_{\max}$ – максимальна частота зміни контрольованого параметра.

Для електропривода, де $f_{\max} \approx 50–100\sim\text{Гц}$, мінімальна частота вибірки становить $f_s = 200\sim\text{Гц} \Rightarrow T_s \leq 5\sim\text{мс}$. Ця вимога застосовується для контурів струму в частотному перетворювачі, але не є обов'язковою для цифрового двійника, який працює з усередненими величинами: моментом, потокозчепленням, температурою.

Порівняння часових параметрів різних рівнів системи наведено у табл.3.

Таблиця 3

Оцінка часових витрат контурів діагностики цифрового двійника

Рівень системи	Функція	Типовий інтервал оновлення, мс
Контур струму (ПЧ)	стабілізація миттєвого моменту	0,1–1
Контур швидкості (ПЛК)	регулювання частоти обертання	1–10
Цифровий двійник (віртуальний рівень)	симуляція потоків, моменту, теплового стану	10–50
Аналітичний рівень (ML / SCADA)	прогноз і візуалізація	100–1000

Інтервал 10–50 мс дозволяє цифровому двійнику фіксувати всі релевантні зміни параметрів двигуна з достатньою точністю та одночасно не перевантажує канали зв'язку (обсяг даних < 50 кБ/с).

Зменшення інтервалу нижче 10 мс не дасть суттєвого приросту точності, але збільшить навантаження на процесор і мережевий трафік.

Таким чином, діапазон 10–50 мс забезпечує мінімальну похибку при помірній обчислювальній вартості.

Частота оновлення цифрового двійника 20–100 Гц (інтервал 10–50 мс) є достатньою для коректного відтворення електромеханічних процесів асинхронного двигуна, прогнозування короткочасних відхилень параметрів та підтримання зв'язку у режимі реального часу без перевантаження системи.

3. Аналітичний рівень.

Забезпечує інтелектуальну обробку даних і формування діагностичних рішень.

Основні завдання:

- аналіз трендів змін параметрів;
- розрахунок спектральних характеристик (FFT/STFT) для вібрацій [10];
- класифікація технічного стану (норма, перегрів, розцентрування, дефект підшипника, міжвиткове замикання);
- прогнозування часу до відмови за допомогою рекурентних нейронних мереж (LSTM).

Дані передаються у цей рівень через *MQTT* або *REST API* з інтервалом 50–200 мс [15].

Алгоритми аналітики реалізовуватимуся на edge-сервері або у хмарному середовищі, що дозволяє масштабувати систему для групи приводів.

4. Рівень HMI/SCADA.

Призначений для відображення результатів моніторингу й діагностики, візуалізації поточних параметрів, побудови енергетичних балансів та передавання даних у вищі рівні керування (*MES/ERP*).

Інтерфейси операторів дозволяють контролювати стан обладнання в реальному часі, переглядати історію трендів і отримувати попередження про відхилення.

5. Контур діагностики та вимоги до швидкодії

Контур діагностики цифрового двійника реалізується як послідовність процесів оброблення даних, що включає:

1. зняття аналогових сигналів із сенсорів;
2. аналого-цифрове перетворення;
3. обмін між контролером і віртуальною моделлю;
4. обчислення діагностичних ознак;
5. формування висновків і передавання результатів на рівень аналітики або SCADA.

Загальний час реакції T_Σ можна подати як суму затримок окремих етапів:

$$T_\Sigma = T_{АЦП} + T_{PLC} + T_{Comm} + T_{Model} + T_{Diag} + T_{Vis},$$

де: $T_{АЦП}$ – час аналого-цифрового перетворення сигналу;

T_{PLC} – затримка циклу контролера;

T_{Comm} – час передавання даних по мережі;

T_{Model} – період оновлення моделі цифрового двійника;

T_{Diag} – час аналітичної обробки сигналів;
T_{Vis} – час оновлення візуалізації.

Таблиця 4

Оцінка часових витрат контурів

Етап	Опис процесу	Типова тривалість, мс	Коментар
Зняття сигналів (датчики)	Перетворення фізичних величин (струм, температура, вібрація) у аналоговий сигнал	0,1–1	Залежить від типу сенсора (MEMS, PT100, Hall)
АЦП (аналогово-цифрове перетворення)	Дискретизація сигналу контролером або модулем збору даних	0,1–5	12–16-бітні АЦП мають типову швидкодію 200–1000 зразків/с
Цикл ПЛК (scan time)	Читання входів, виконання програми, запис виходів	5–20	Для ПЛК середнього рівня (Schneider M580, Siemens S7-1500)
Обмін по мережі (Ethernet, Modbus TCP)	Передавання пакетів даних між ПЛК і цифровим двійником	2–10	Визначається швидкістю шини 100 Мбіт/с і розміром кадру
Оновлення моделі двійника	Інтеграція рівнянь dq-моделі, теплової та вібраційної підсистем	10–50	Вибраний інтервал обґрунтований вище
Аналітична обробка (FFT, ML)	Розрахунок спектрів, прогноз, класифікація	10–30	На основі пакетної обробки даних (256–512 точок)
Візуалізація (SCADA / HMI)	Оновлення екрану, запис у базу даних	100–1000	Відповідає людському сприйняттю, не впливає на контроль

Сумарна затримка контуру діагностики:

$$T_{\Sigma} \approx 30\text{–}80 \quad \text{мс},$$

що відповідає для систем технічного моніторингу та дозволяє фіксувати зміни параметрів на частотах до 10–20 Гц без втрати інформативності [16].

Урахування ролі ПЛК у діагностиці.

У запропонованій архітектурі контур діагностики може бути реалізований у двох варіантах табл. 5.

Таблиця 5

Порівняння варіантів реалізації контуру діагностики.

Варіант	Джерело даних	Обробка	Коментар
А. Через ПЛК (вбудований режим)	Датчики → ПЛК → цифровий двійник	Виконується у циклі ПЛК (5–20 мс)	Синхронізовано з основним керуванням, висока достовірність, але більша затримка
Б. Через паралельний канал (Edge Gateway)	Датчики → шлюз → цифровий двійник	Паралельна обробка, поза циклом ПЛК	Вища швидкодія (5–10 мс), мінімальний вплив на керування

Вибір варіанту залежить від доступної обчислювальної потужності та критичності часу реакції. Для прогнозно-аналітичних задач доцільно застосовувати паралельний канал (*Edge Gateway* або *IoT-шлюз*), а для оперативного контролю стану – безпосередньо цикл ПЛК.

Баланс точності й швидкодії.

Для досягнення компромісу між інформативністю діагностичних ознак і частотою оновлення сигналів використовується комбінований підхід:

- високочастотні сигнали (вібрації, струми) дискретизуються з частотою 1–5 кГц у модулі збору даних, але передаються у цифровий двійник пакетно з інтервалом 10–50 мс у вигляді узагальнених характеристик (RMS, THD, спектральні піки);
- повільні сигнали (температура, момент, енергія) опитуються з інтервалом 0,5–1 с.

Такий підхід дозволяє суттєво зменшити навантаження на мережу та забезпечити необхідну роздільну здатність для діагностики.

6. Особливості реалізації

Ключовими властивостями запропонованої архітектури є:

- модульність – можливість підключення або вимкнення окремих підсистем без перебудови всієї системи;
- масштабованість – здатність охоплювати один або декілька приводів у спільному аналітичному середовищі;
- взаємодія у реальному часі – затримка не перевищує 80 мс при оновленні даних із частотою 100 мс;
- енергетична інтеграція – можливість формування балансу потужності для розрахунку ефективності роботи;
- відкритість інтерфейсів – використання стандартів OPC UA, MQTT, REST забезпечує сумісність із різними апаратними платформами.

7. Функціональне призначення архітектури

Завдяки взаємодії всіх рівнів система забезпечує:

- онлайн-оцінювання технічного стану електропривода за даними датчиків і моделі;

- побудову прогнозів деградації обмоток, підшипників, механічних з’єднань;
- енергетичну аналітику, включно з розрахунком ККД і втрат;
- передавання коригувальних команд до контролера або оператора;
- інтеграцію з системами технічного обслуговування (CMMS, ERP) для автоматичного планування ремонтів.

Практична реалізація та підготовчі експерименти

На даному етапі дослідження здійснюється аналіз можливостей реалізації цифрового двійника електропривода у лабораторних та промислових умовах, а також збір експериментальних даних для калібрування параметрів математичної моделі.

Основну увагу приділено оцінюванню обчислювальних і комунікаційних можливостей системи, аналізу часових затримок під час передавання сигналів та перевірці сумісності апаратних компонентів.

1. Поточний стан реалізації

Розроблено прототип архітектури цифрового двійника, який включає такі компоненти:

- контролер Modicon M580, що виконує зчитування сигналів струму, напруги, швидкості та температури з реального електропривода;
- периферійні сенсорні модулі (аналого-цифрові перетворювачі, датчики вібрацій IO-Link, термопари типу PT100);
- комунікаційні канали *Modbus TCP* та *Ethernet/IP* для обміну з комп’ютерною моделлю;
- віртуальну dq-модель, реалізовану у середовищі MATLAB/Simulink та Python (NumPy, SciPy);
- проміжний аналітичний сервер (Edge Gateway) для фільтрації та попередньої обробки сигналів.
-

Виконується тестування пропускної здатності мережі, визначення затримок АЦП і циклу ПЛК для подальшого налаштування параметрів цифрового двійника.

2. Тестування часових характеристик

Проведено серію попередніх вимірювань часу реакції системи при різних конфігураціях обробки сигналів. Результати наведено у табл.6.

Таблиця 6

Результати тестування часових характеристик системи.

Етап процесу	Джерело даних	Типова затримка, мс	Коментар
Аналого-цифрове перетворення (АЦП)	Модуль вводу аналогових сигналів ПЛК	1–3	залежить від роздільної здатності та частоти дискретизації
Обробка у циклі ПЛК	Modicon M580 (scan time)	10–20	при кількості 200 тегів
Передавання по мережі	Modbus TCP, 100 Мбіт/с	3–8	залежить від обсягу пакета
Оновлення dq-моделі	MATLAB/Simulink (локально)	10–50	залежно від розміру кроку інтеграції
Передача результатів у аналітичний рівень	MQTT / REST API	5–10	тестовано на локальному сервері
Загальна затримка системи	–	30–80	відповідає реальному часу для моніторингу

Результати підтверджують, що загальний час реакції системи не перевищує 80 мс, що забезпечує можливість діагностики швидких електромеханічних процесів і коректну роботу в режимі онлайн-моніторингу.

3. Аналіз обчислювальних можливостей

Виконано орієнтовні розрахунки навантаження процесора при різних варіантах реалізації моделі. Для dq-моделі асинхронного двигуна із тепловою підсистемою (6 диференціальних рівнянь + 3 алгебраїчних) середній час інтеграції одного кроку становить 0,3–0,8 мс при обробці в середовищі MATLAB.

Такий підхід забезпечує можливість моделювання у реальному масштабі часу з частотою до 100 Гц без перевантаження обчислювальних ресурсів персонального комп’ютера.

4. Подальші кроки експериментальної роботи

План реалізації подальших етапів включає:

1. Калібрування моделі на основі виміряних струмів, напруг і швидкості реального привода.
2. Верифікацію dq-моделі через порівняння експериментальних і розрахункових характеристик (момент, струм, ККД).
3. Тестування контурів діагностики для виявлення типових дефектів (перегрів, вібраційні аномалії, міжвиткові замикання).
4. Розширення аналітичного рівня за рахунок алгоритмів машинного навчання для прогнозу стану.
5. Розроблення інтерфейсу SCADA/HMI з візуалізацією параметрів та формуванням звітів.

5. Прогнозовані результати

Виходячи з результатів попереднього аналізу, очікується, що реалізований цифровий двійник забезпечить:

- точність відтворення електромагнітних процесів у межах 3–5 %;
- можливість виявлення змін параметрів двигуна (Rs, Lm, J) при їхній варіації понад 2–3 %;
- інтеграцію із системами SCADA та MES без перевищення допустимих затримок зв'язку;
- формування бази даних для подальшого навчання моделей прогнозу стану (*Predictive Maintenance*).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні узагальненої архітектури цифрового двійника електропривода, яка поєднує електромагнітну dq-модель з тепловою, вібраційною та мережево-енергетичною підсистемами у єдиному інформаційному середовищі.

Запропоновано структуру контурів діагностики з урахуванням реальних часових затримок АЦП, циклу ПЛК та комунікаційних каналів, що забезпечує роботу системи у режимі реального часу з частотою оновлення 10–50 мс.

Висновки.

1. В результаті проведеної роботи сформовано концептуальну модель цифрового двійника електропривода та визначено параметри, необхідні для його реалізації.
2. Проведено аналіз та узагальнення підходів до побудови цифрових двійників електроприводів промислових об'єктів, обґрунтовано доцільність використання dq-моделі як базової для моделювання електромагнітних процесів.
3. Розроблено концепцію архітектури цифрового двійника з багаторівневою структурою (фізичний, віртуальний, аналітичний і SCADA-рівні) та визначено вимоги до часових характеристик контурів керування й діагностики.
4. Проведено оцінку технічних можливостей апаратно-програмної реалізації, визначено затримки, обчислювальні витрати та пропускну здатність комунікацій, що підтвердило доцільність роботи системи у діапазоні 30–80 мс.
5. Результати підготовчого етапу створюють основу для подальшої експериментальної верифікації моделі та впровадження систем прогнозного технічного обслуговування (*Predictive Maintenance*) на базі цифрових двійників електроприводів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art and Future Trends. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415.
2. Fuller A., Fan Z., Day C., Barclay P. Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971.
3. Glaessgen E., Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. 51st AIAA/ASME Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Orlando, 2010. P. 1–14.

4. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. CIMdata, 2015. 28 p.
5. Vas P. Vector Control of AC Machines. Oxford: Oxford University Press, 1990. 330 p.
6. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 711 p.
7. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd ed. Berlin: Springer, 2001. 456 p.
8. Delaleau E., Louis J.-P., Ortega R. Modeling and Control of Induction Motors. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2001. Vol. 11, No. 1. P. 105–129.
9. Németh Z., Kuczmann M. State-Space Modeling Theory of Induction Machines. Pollack Periodica. 2020. Vol. 15, No. 1. P. 124–135.
10. Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. Sensors. 2025. Vol. 25, No. 8. Article 2625.
11. IEC 60034-1:2017. Rotating Electrical Machines – Rating and Performance. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. 98 p.
12. ДСТУ IEC 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Номінальні дані та характеристики. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 102 с.
13. ДСТУ EN 61800-5-1:2016. Системи електроприводу з регульованою швидкістю. Вимоги до електробезпеки та енергетичних показників. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
14. IEC 62443-3-3:2019. Industrial Communication Networks – Network and System Security – System Security Requirements and Security Levels. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2019.
15. Kostenko D., Kudryashov N., Maystrishin M., Potekhin V. Digital Twin Applications: Diagnostics, Optimisation and Prediction. Proceedings of the 29th DAAAM Symposium. 2018. P. 575–580.
16. Schneider Electric. EcoStruxure™ Power. Digital Applications for Large Buildings and Critical Facilities. IEC Design Guide. Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2022. 266 p.

УДК 681.5:621.314.57

С.М. Ткаченко[1], Л.В. Бешта[1], Б.С. Біліба[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОД ПОЗИЦІОНУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРА З ТРЬОМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНИХ НАВЧАЛЬНИХ СТЕНДІВ

Анотація. Розглянуто модель маніпулятора навчальної сортувальної фабрики та особливості керування його рухами. Через конструкційні обмеження маніпулятор виконує переміщення лише послідовно, використовуючи реверсивні двигуни 24 В з фіксованою швидкістю. Проаналізовано операції прямого й зворотного переміщення, алгоритм повного циклу роботи та вимоги до безпечного обертання. Отримані результати можуть бути використані для створення кіберфізичних систем керування маніпуляторами.

***Ключові слова**: маніпулятор, кіберфізична система, граф позиціонування, матриця переходів, алгоритм переміщення.*

Вступ. Сучасний розвиток кіберфізичних систем та інтелектуальних виробничих комплексів значно підвищує вимоги до підготовки фахівців у галузях мехатроніки, автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Навчальні центри дедалі ширше використовують тренажери та симулятори промислового обладнання, що дозволяють студентам працювати з моделями реальних технологічних процесів. Одним із найважливіших компонентів таких стендів є маніпулятори, які виконують функції транспортування, сортування та взаємодії з об'єктами на навчальній фабриці.

Метою роботи є обґрунтування методу керування переміщенням вакуумного захоплювача маніпулятора у тривимірній системі координат, придатного для кіберфізичної системи на контролерах S7-1200, використаних у загальній кіберфізичній системі керування стендом-макетом сортувальної фабрики, виходячи з аналізу конструкції, давачів та виконавчих органів, кінематичної схеми рухів діючої моделі маніпулятора, наявних датчиків та виконавчих механізмів.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі запропоновано метод, що ґрунтується на описі кінематичної моделі маніпулятора, побудові матриці координат рухів та проектуванні графу позиціонування, виконаного на основі елементів мереж Петрі. Наведений підхід дає можливість здійснювати надійне керування як прямим, так і зворотним переміщенням деталей між визначеними позиціями, забезпечуючи безпечну роботу всіх механічних компонентів.

Основний зміст роботи. Маніпулятор, що встановлений у навчальній лабораторії НТУ «Дніпровська політехніка», побудований на основі промислового набору Fischertechnik Factory Simulation. Його конструкція включає:

- обертову несучу конструкцію з реверсивним двигуном постійного струму;
- вертикальну кінематичну пару для руху консолі вгору-вниз;
- телескопічну ланку, що здійснює горизонтальні рухи;
- вакуумний захоплювач для маніпуляцій з деталями;
- комплект датчиків – енкодери, кінцеві вимикачі для калібрування;
- керування через 24-вольтові мотор-редуктори з фіксованою швидкістю.

Усі рухи здійснюються з постійною швидкістю, що дозволяє використовувати для визначення координат або імпульси енкодерів, або програмні таймери контролера. Це дає можливість формувати координати як у системі абсолютних, так і у системі відносних координат.

Враховуючи три ступені свободи, рух маніпулятора описується як сукупність трьох незалежних кінематичних пар:

- осьове обертання навколо вертикальної осі (полярна координата M);
- горизонтальний рух телескопічної ланки (координата X);
- вертикальний рух консолі (координата Z).

Оскільки маніпулятор працює на реверсивних двигунах 24 В без регулювання швидкості, усі його рухи відбуваються з постійною швидкістю. Тому параметри переміщення можна задавати як у просторових, так і часових координатах, використовуючи імпульси енкодерів або таймери контролера. Відтак у матриці руху положення захоплювача задається трьома парами координат.

$$M([p1;\quad n1];\ [p2;\quad n2];\ [p3;\quad n3]), \tag{1}$$

або

$$M([q1;\quad n1];\ [q2;\quad n2];\ [q3;\quad n3]) \tag{2}$$

де $p1, p2, p3$ – кількість імпульсів, яка надійшла від енкодерів, починаючи з початку руху від деякого положення маніпулятора без урахування напряму руху;

$q1, q2, q3$ – кількість імпульсів лічильників, яка відділяє поточне положення M від початкового положення маніпулятора і є, фактично, координатами;

$n1, n2, n3 \in (-1;\ \ 0;\ \ 1)$ – числове вираження напрямку руху конструкції та кінематичних ланок маніпулятора, умовно: реверсивний, відсутній, прямий.

Важливим є розмежування між простим підрахунком імпульсів та реверсивним підрахунком, оскільки лише другий варіант дає змогу точно визначити положення у тривимірній системі координат для будь-якої точки.

Алгоритм повного переміщення деталі. Маніпулятор виконує типові операції: захоплення, транспортування та відпускання деталей. Однак через конструкційні обмеження:

- маніпулятор не може зміщуватися по двох або трьох осях одночасно;

- безпечне обертання можливе лише при піднятті консолі на визначену висоту та втягненні телескопічної ланки.

Отже, перед переміщенням між двома точками завжди виконується стандартний цикл: підняти консоль до безпечної висоти, втягнути горизонтальну ланку, виконати обертання, висунути ланку до цільової позиції, виконати вертикальне переміщення, здійснити операцію захоплення або відпускання, повернутися в початкове положення для калібрування.

Таким чином, повернення до початкової позиції після кожного циклу є важливим для уникнення накопичення похибок, пов'язаних з механічними люфтами та неточностями датчиків.

Для формального опису руху запропоновано матрицю переходів, яка відображає початкові та цільові координати у вигляді набору трійок:

$$(\theta, x, z, d)\ , \tag{3}$$

де: θ, x, z – цільові або початкові координати;

- d – напрям руху (прямий, реверсивний).

Матриця переходів дає змогу програмно реалізувати функціональний блок позиціонування маніпулятора, який отримує координати з бази еталонних позицій і подає сигнали керування на виконавчі механізми.

Мережі Петрі дозволяють формалізувати роботу маніпулятора як послідовність дискретних станів:

- DS0 – початковий калібрований стан;
- DS1-DS6 – етапи виконання окремих рухів;
- DSp – стан технологічної паузи для активації вакуумного захоплювача.

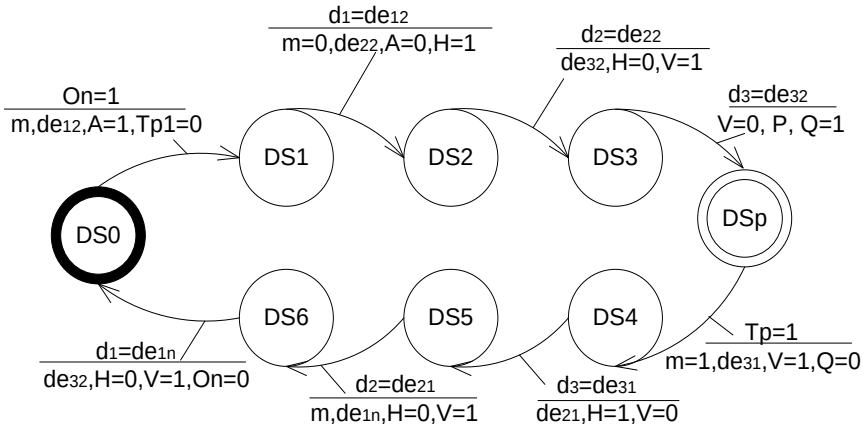


Рис. 1. Граф позиціонування маніпулятора між парою позицій

Умови переходів у графі включають: поточні координати, еталонні координати цільових точок, стан сенсорів, сигнали керування «Так/Ні», тривалість паузи для вакуумної системи. Завдяки такій моделі система керування може точно визначати момент завершення певного руху та безпечно переходити до наступного етапу.

Висновки. Дослідження пропонує комплексний метод керування переміщенням маніпулятора з трьома ступенями свободи у складі кіберфізичної системи. До складу методу входять: алгоритм повного циклу переміщення деталі, матриця координат рухів виконавчого органу, граф позиціонування, побудований за принципами мереж Петрі. Розроблений підхід дозволяє забезпечити високу точність та безпечність рухів за умови обмежень конструкції маніпулятора. Метод апробовано в лабораторії НТУ «Дніпровська політехніка», де створено програмне забезпечення для контролера S7-1200 та реалізовано пряме і зворотне переміщення деталей за емпірично визначеними координатами. Надалі метод планується використовувати у навчанні студентів основам програмування промислових кіберфізичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. С. Ткаченко, Д. Бешта, Л. Бешта. Результати дослідження та впровадження у навчальний процес моделі-симулятора автоматизованої фабрики. //Information Technology: Computer science, software engineering and cyber security, Випуск 2. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Видавничий дім «Гельветика» 2023, – стор. 81-89.
2. Попов С.В., Бучинський М.Я., Гнітько С.М., Чернявський А.М. Теорія механізмів технологічних машин: підручник для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти. – Харків: НТМТ, 2019. 268 с.
3. Цвіркун Л. І. Робототехніка та мехатроніка : навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер; під заг. ред. Л. І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Держ. вищий навч. закл. "Нац. гірн. ун-т". - 3-тє вид., перероб. і доп. - Дніпро : НГУ, 2017. – 224 с.
4. Fischertechnik SPS Trainingsmodelle (sps4you.de). Fischertechnik SPS-Modelle Preisliste und Informationen. – 19 p. (дата звертання: 20.10.2025).
5. Factory Simulation 24V – Datasheet. URL: http://surl.li/googf (дата звернення 24.10.2025).

УДК 629.8:621.3:004.8:621.3.015

А.А. Штуць[1]
[1]Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МАШИНАМИ В МЕХАТРОНІЦІ ТА РОБОТОТЕХНІЦІ

Анотація. Підвищення ефективності та надійності роботи дифузійного апарата цукрового заводу шляхом модернізації електроприводу на основі мехатронного підходу з асинхронним двигуном і частотним керуванням. Запропонована система поєднує електромеханічний модуль, сенсорні елементи та модуль штучного інтелекту, що забезпечує адаптивне керування, зниження енергоспоживання на 12–15 % та підвищення надійності обладнання.

***Ключові слова**: мехатронна система, інтелектуальне керування, асинхронний електродвигун, частотне регулювання, дифузійний апарат, енергоефективність, цукрове виробництво.*

Вступ. На даний момент у системі електроприводу дифузійного апарата цукрового виробництва застосовуються двигуни постійного струму, які, незважаючи на свою історичну поширеність, мають суттєві недоліки, що істотно впливають на ефективність, надійність і економічність роботи обладнання. Головною проблемою є значні експлуатаційні витрати, пов’язані з обслуговуванням та ремонтом таких двигунів. Це зумовлено складністю їх конструкції, наявністю колекторно-щіткового вузла, підвищеним зношуванням контактних елементів, і, як наслідок, частими простоями технологічного обладнання через необхідність технічного обслуговування.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

1. Розробити мехатронний електропривод дифузійного апарата з асинхронним двигуном та частотним регулюванням для забезпечення адаптивного інтелектуального керування процесом дифузії.

2. Впровадити систему сенсорного контролю та аналізу параметрів роботи апарата для підвищення надійності, точності регулювання та енергоефективності обладнання.

Основний зміст роботи. Процес отримання соку дифузійним методом ґрунтується на протиточному витяганні цукру з нарізаної стружки цукрового буряку за допомогою гарячої води. У цьому процесі цукроза та частина нецукрів поступово переходять у воду, що призводить до зниження їх вмісту в стружці та одночасного збільшення концентрації у витяжному розчині [1, 2].

Дифузія цукру відбувається у бурякопереробному відділенні цукрового заводу, де основним обладнанням є дифузійний апарат. Найбільш поширеними є апарати похилого типу.

При аналізі дифузійного апарату та його допоміжних агрегатів були виділені ключові характеристики та параметри, необхідні для його оптимальної роботи:

- повне проходження стружки вздовж апарату триває 70–80 хвилин;
- мінімальна швидкість обертання апарату становить 0,4 об/хв, максимальна – 1,2 об/хв;
- температура всередині апарату – 58–74 °С;
- швидкість обертання двигуна – 1470 об/хв;
- середня споживана двигуном потужність – близько 90 кВт.

Для регулювання швидкості обертання апарату в діапазоні 0,4–1,2 об/хв застосовується механічний редуктор із понижувальним передаточним числом 1:250. Мінімальна швидкість обертання валу двигуна постійного струму при цьому зберігає його механічні характеристики. Зазвичай максимальна швидкість обертання двигуна в системі привода дифузії обмежується 1500 об/хв.

Продуктивність дифузійного апарату залежить від питомого навантаження та швидкості переміщення стружки і складає близько 2,5 тис. тонн стружки на добу. На сучасних цукрових заводах для привода апаратів здебільшого використовуються електродвигуни постійного струму, які мають перевагу у відносно простому регулюванні частоти обертання [1, 2, 3].

Проте існуючі електроприводи постійного струму мають низку недоліків:

- низький ступінь захисту електродвигуна;
- обмежена завадостійкість;
- великі габарити;
- складність налаштування;
- нестабільність параметрів;
- необхідність регулярного технічного обслуговування;
- середній рівень надійності.
- Ці недоліки обумовлені двома основними факторами:

1. Низький ступінь захисту двигунів постійного струму, що експлуатуються у важких кліматичних умовах із наявністю агресивних середовищ (пари аміаку, сірки), що призводить до їх прискореного зносу та передчасного виходу з ладу.

2. Використання тиристорних перетворювачів, які не відповідають сучасним вимогам щодо якості та надійності.

- Асинхронні електродвигуни є найбільш розповсюдженими у промисловості. Їхні основні переваги включають:
- простоту конструкції та експлуатації;
- високу надійність та відносну легкість ремонту;
- меншу масу, габарити та вартість.
- У системах електроприводу робочих машин найчастіше застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серій 4А, 4АМ та АИ. Вони мають наступні граничні номінальні параметри:
- номінальна потужність при напругах 220, 380, 660 В – від 0,025 до 400 кВт;

- при напругах 6–10 кВ – від 500 до 8000 кВт.

- синхронні частоти обертання: 500, 600, 750, 1000, 1500, 3000 об/хв.

Ці двигуни знайшли застосування у всіх галузях господарства. Частота обертання ротора асинхронного двигуна визначається, як відомо, виразом:

$$n = 60f(1 - s)/p \qquad (1)$$

де f – частота напруги живлення, Гц;

s – ковзання;

p - число пар полюсів.

З цього випливає, що частоту обертання асинхронних двигунів можна регулювати шляхом зміни будь-якої з трьох величин: ковзання, частоти струму в статорі або кількості пар полюсів в обмотці статора [5,6,8].

Сучасний розвиток силової перетворювальної техніки дозволив створення та серійне виробництво різних типів напівпровідникових перетворювачів частоти. Це сприяло стрімкому розвитку і широкому застосуванню частотно-регульованих асинхронних електроприводів.

Основними перевагами таких систем регульованого електроприводу є:

- плавність регулювання та висока жорсткість механічних характеристик, що забезпечує точне підтримання швидкості у широкому діапазоні;
- економічність регулювання, обумовлена тим, що двигун працює з малими величинами абсолютного ковзання, а втрати в ньому не перевищують номінальні значення.

Розглянемо можливість використання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у складі приводу з такими параметрами:

- потужність – 90 кВт;
- швидкість обертання – 1500 об/хв;
- діапазон регулювання швидкості – від 0,4 до 1,2 об/хв.

Механічні характеристики такого двигуна забезпечують стабільну роботу при частотно-регульованому приводі, а схема заміщення фази двигуна при частотному керуванні представлена на рисунку 1 [5, 6].

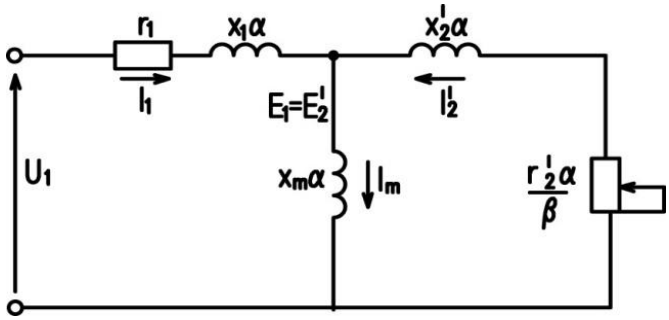


Рис. 1. Схема заміщення фази асинхронного двигуна при частотному управлінні

Таблиця 1

Система оснащена датчиками для всебічного контролю параметрів процесу:

Тип датчика	Призначення	Технологія/Сигнал
Температурні	Контроль оптимальної температури стружки та води (58–74 °C)	Термопари або цифрові сенсори 4–20 мА
Швидкості обертання	Підтримка стабільного потоку стружки	Енкодери, індукційні сенсори
Навантаження на вал	Виявлення перевантаження, контроль крутного моменту	Тензометричні або магнітні сенсори
Рівень стружки та рідини	Автоматичне регулювання співвідношення буряку та води	Ультразвукові, ємнісні сенсори
Вібраційні/шумові	Діагностика редуктора та двигуна, попередження аварій	Вібраційні акселерометри, шумові датчики

Сигнали з усіх сенсорів передаються на ПЛК, що забезпечує обробку даних у реальному часі та управління виконавчими механізмами.

Датчики температури бурякової стружки та води дозволяють контролювати оптимальні умови дифузії у межах 58–74 °C. Використання цифрових сенсорів або термопар з вихідним сигналом 4–20 мА забезпечує точний моніторинг температури та передачу даних на ПЛК для адаптивного регулювання потужності електроприводу.

Датчики швидкості обертання ротора забезпечують підтримання стабільного потоку стружки та точне регулювання механізму. Енкодери або індукційні сенсори передають сигнали на ПЛК для обробки та корекції частоти обертання в межах 0,4–1,2 об/хв.

Датчики навантаження на валу двигуна визначають крутний момент і попереджають перевантаження. Тензометричні або магнітні сенсори інтегруються безпосередньо з валом двигуна та передають сигнали в систему для динамічного регулювання частоти та напруги.

Датчики рівня стружки та рідких фаз автоматично підтримують оптимальне співвідношення буряку та води в апараті. Ультразвукові або ємнісні сенсори передають інформацію про об’єм стружки та рідини для управління клапанами подачі води та адаптації швидкості переміщення стружки [6,7].

Наукова новизна. роботи полягає у розробці мехатронного електроприводу дифузійного апарата цукрового заводу на основі асинхронного двигуна з частотним регулюванням, що забезпечує адаптивне інтелектуальне керування процесом. Запропонована система поєднує електромеханічний модуль і сенсорні елементи, що підвищує надійність, точність регулювання та енергоефективність обладнання.

Висновки. Впровадження асинхронного двигуна змінного струму з частотним регулюванням у мехатронний електропривод дифузійного апарата

цукрового заводу підвищує надійність, енергоефективність та точність регулювання обладнання, зменшуючи витрати на обслуговування та сприяючи реалізації принципів «інтелектуального виробництва».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стаднік М.І., Штуць А.А., Єленич А.П. Дослідження методу забезпечення автономного електропостачання тваринницької ферми на основі комбінування базових та стохастичних джерел енергії. *Вібрації в техніці та технологіях*2025. № 1 (116). С. 63 –74.
2. Стаднік М.І., Штуць А.А., Колісник М.А. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (128) С. 122- 134
3. Возняк О.М., Штуць А.А., Тихонов В. К. Дослідження моделі галузі електроенергетики та методики виконання вимірювань якості електроенергії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2022. № 1 (116). С. 150-163.
4. Stadnik M., Shtuts A., Kolisnyk M., Hryhorenko N. Research on the implementation of intelligent systems to increase the reliability and efficiency of the operation of electric power complexes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2025. № 1 (128). С.
5. Стаднік М. І., Грицун А.В., Проценко Д. П. Метод покриття графіку навантаження тваринницької ферми при автономному електропостачанні, на базі біогазових установок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2019. № 4 (107). С. 79-87.
6. Стаднік М.І., Штуць А.А., Пилипенко О.В. Рівень енергозабезпечення тваринницьких ферм за рахунок біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 100 -112.
7. Стаднік М.І. Оптимізація складу генеруючого обладнання автономного енергопостачаня тваринницької ферми при використанні біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК,* 2018. №2(101). С. 81–88.
8. Стаднік М.І., Видмиш А.А., Штуць А.А., Колісник М.А. «Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика». Навчальний посібник. Вінниця. РВВ ВНАУ 2020. 331 с.
9. Возняк О. М., Штуць А.А., Наавгуст О.П. Аналіз комплексної моделі моніторингу параметрів якості електроенергетики. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2021. № 4 (115). С.
10. Розен В.П., Іншеков Є.М., Калінчик І.В. Оптимізація процесів вироблення електроенергії комбінованою електроенергетичною системою. *Енергетика.* 2013. №. 1. С. 20–26.

РОЗДІЛ 7

ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНІСТЬ.

UDC 629.349:62-83:621.317.38

O.S. Beshta[1], O.O. Beshta[1], T.O. Khalaimov[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

REMOTE CONTROL SYSTEM FOR A LABORATORY TEST BENCH FOR REAL-TIME ASSESSMENT OF BATTERY-ELECTRIC VEHICLE ENERGY CONSUMPTION

Abstract. This paper describes the development of a real-time Remote Control System (RCS) for a laboratory test bench evaluating the energy consumption of a tricycle-type Battery-Electric Vehicle (BEV). The system is designed to conduct fully reproducible experiments without operator involvement while meeting safety requirements. Experimental data are transmitted to a server and visualized in a web interface.

Keywords: *energy-efficiency assessment, remote control, electric vehicles, cloud systems, laboratory test bench, web interface.*

Introduction. Recent years have seen a sustained trend towards the creation and deployment of systems that improve energy efficiency across sectors. Power engineering is no exception: the share of renewable sources in total generation is increasing annually in leading European countries [1], driven by strategies to shift from high-CO_2-emission sources to alternative technologies [2].

In Ukraine, the active rollout of alternative energy and distributed generation has been accelerated by wartime conditions and the effective loss of a significant portion of thermal generation assets due to the aggressor state. This necessitates technical solutions both to ramp up generation and to implement energy-efficient technologies.

The transport sector is responding with a gradual transition [3] from internal combustion engine (ICE) vehicles to Battery-Electric Vehicles (BEVs). This transition is primarily slowed by limited driving range and lengthy charging times [4]. BEV energy consumption in motion is affected by external and internal factors: route topology, condition and density of infrastructure, weather, driving style, and others [5]. One of the most influential factors is route topology, as it significantly affects the energy consumption of the traction electric drive [6] and determines the potential for regenerative braking. Under current conditions, improving energy efficiency directly increases driving range, reduces charging costs, and helps maintain mobility during prolonged power outages.

To study the effect of route topology on energy consumption, a Loading Unit (LU) was developed at Dnipro University of Technology (Fig. 1, item B). In laboratory

conditions it reproduces, in an equivalent manner, the rolling-resistance component associated with the route profile angle.

Given the rapid shift of educational processes worldwide—and particularly in Ukraine—to online formats, creating a Remote Control System (RCS) for the LU is expedient. International practice offers examples of remote laboratories and benches [7] that provide online access and help avoid duplicating physical infrastructure across partner university networks.

Problem statement: The objective is to create an RCS for conducting reproducible real-time experiments. To achieve this objective, the following tasks are addressed:

- determine the conditions required to operate the bench during online experiments [7];
- analyze the LU for compliance with the requirements for remote laboratory benches;
- compile a list of key components for the RCS;
- develop a structural diagram of the RCS implementation.

Main content: An analysis of the requirements for online laboratory experiments [7] shows that the bench-integrated RCS must:

- ensure autonomous experiment execution with automatic return to the initial state, without operator involvement; only irregular maintenance is permitted;
- provide process visibility via online video streaming;
- support limiting a single experiment to 5–15 minutes to enable series of sessions for academic groups;
- minimize real-time computational load on the server side;
- operate with an Internet connection of approximately 0.5–1 Gbit/s;
- integrate seamlessly into existing curricula and deliver practical value;
- be scalable with respect to additional experiments and measurement channels.

Loading Unit (LU) composition (Fig. 1):

1) Metal frame with support rollers and a Loading Machine (LM); the resistive torque is transmitted via a belt drive (Fig. 1, item B).
2) Tricycle-type BEV (Fig. 1, item A) with a remote speed-control subsystem and a real-time battery consumption monitoring subsystem.
3) Control and monitoring system with a PC-based HMI panel.

Safety and reproducibility. The tricycle is secured to the LU frame with straps, ensuring reliability during experiments. The bench design provides self-return to the initial position. No technical servicing is required even during battery charging; during this period, instead of drive-cycle consumption studies, charging-curve experiments can be conducted with subsequent evaluation of State of Charge (SoC) and State of Health (SoH). To ensure safety during experiments, the LU area must be physically guarded, with visual state indication and emergency-stop buttons for both the bench and tricycle braking. Visual control of the experiment can be provided by a single IP

camera capturing the wheel rotation on the rollers and the moments when the LM is engaged.

Fig. 1. Loading Unit with tricycle

Experiment parameters and measurements. The standardized Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC) Class 3b, LOW phase used in the current LU configuration lasts 589 s, which meets the 5–15-minute requirement and enables a series of tests within one class session. To analyze energy consumption with the route-topology factor considered, the RCS must acquire and display the following signals:

- angular speed (rpm) of the traction wheel;
- battery pack voltage and current of the tricycle;
- LM voltage and current.

For SoC/SoH studies, voltages of 12 modules in a 12S pack (12 analog channels) are additionally recorded. Signals related to traction energy-consumption assessment must be processed and displayed at ≥1 Hz; a rate of 0.2 Hz is sufficient for SoC/SoH determination.

RCS architecture and hardware. For low-latency data exchange, a COM (USB) connection is used. Data from the ESP32-based remote control and monitoring subsystems are delivered to a single-board computer acting as the master node and web server. An additional microcontroller-based subsystem measures the module voltages of the battery pack. The institutional network infrastructure allows throughput up to 1 Gbit/s.

Bill of materials (core components):

1. IP camera Hikvision DS-2CD1021-I(F) (2.8 mm).
2. Single-board computer Raspberry Pi 4 Model B, 8 GB.
3. Arduino Uno Rev3 with ATmega328P.
4. Router MikroTik hAP ac² (RBD52G-5HACD2HND-TC) (up to 1 Gbit/s).

The structural organization of the RCS is shown in Fig. 2. The Raspberry Pi 4 functions as the master device and user access hub: it runs the web server and provides browser-based access to the laboratory experiment. The Arduino Uno acquires battery module voltages and transmits them to the Raspberry Pi 4 over a COM port. Two ESP32 controllers manage the remote speed-control subsystem and the battery energy-consumption monitoring subsystem; their data are likewise delivered via COM. The IP-camera stream is captured and transcoded on the Raspberry Pi. The MikroTik router provides high-speed Internet access.

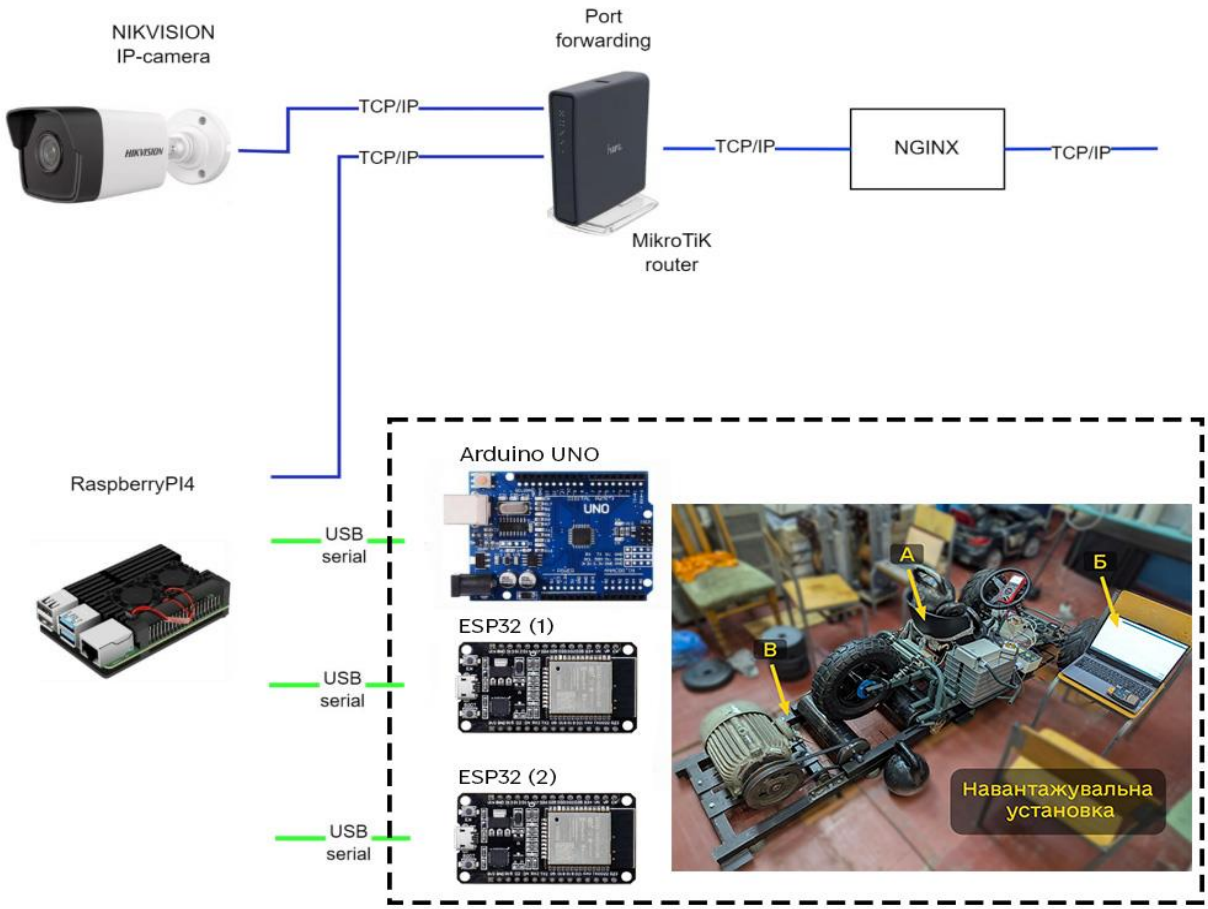


Fig. 2. Structural diagram of the RCS

Integration into the educational process and scalability. The developed remote experiment integrates into the educational programs of specialty G3 “Electrical Engineering” and can be used across a network of partner institutions. Flexibility is achieved through the possibility of studying additional factors (wind, driving style, road surface type, and infrastructure) and connecting external sensors.

Conclusions:

1. The requirements for organizing real-time online experiments for a BEV-tricycle energy-consumption test bench have been defined, and the existing LU has been confirmed to meet these requirements.
2. A hardware–software architecture of the RCS has been formulated, and its structural diagram has been presented using Raspberry Pi 4, Arduino Uno, two ESP32 controllers, an IP camera, and a MikroTik router.
3. It has been shown that the selected configuration ensures experiment reproducibility, the required data-acquisition rates (≥1 Hz for energy-consumption studies in motion and 0.2 Hz for SoC/SoH), visual process supervision, and safe bench operation without continuous operator presence.
4. The proposed solution is scalable and suitable for integration into the curricula of multiple institutions, as well as for extending the set of investigated factors.

REFERENCES

1. Electricity from renewable sources reaches 47% in 2024'. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250319-1
2. The European Green Deal - European Commission'. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
3. Mobility strategy - Mobility and Transport - European Commission'. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en
4. A. R. Mesquita, V. H. S. de Abreu, C. N. Poyares, and A. S. Santos, 'Barriers to Electric Vehicle Adoption: A Framework to Accelerate the Transition to Sustainable Mobility', *Sustainability*, vol. 17, no. 18, p. 8318, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17188318.
5. A. Skuza and R. S. Jurecki, 'Analysis of factors affecting the energy consumption of an EV vehicle - a literature study', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1247, no. 1, p. 012001, Jul. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1247/1/012001.
6. O. S. Beshta, O. O. Beshta, S. S. Khudolii, T. O. Khalaimov, and V. S. Fedoreiko, 'Electric vehicle energy consumption taking into account the route topology', no. 2, pp. 104–112, 2024, doi: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/104.
7. Laboratories Across Borders'. Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.lab-project.eu/

УДК 621.31

A.A. Kolb[1]
[1]Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF THE STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATION NETWORK IN UKRAINE UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS

Abstract. This analysis examines the current state of electric vehicle (EV) charging infrastructure in Ukraine amid the ongoing military conflict, highlighting its resilience with approximately 1,500–3,200 public stations as of 2025, despite challenges such as grid instability and high operational costs. It discusses growth factors, including a 52% surge in EV imports and a doubling of domestic production, while addressing barriers such as uneven regional distribution and energy disruptions caused by the conflict. The prospects include expansion to 20,000 stations by 2030 in line with the National Energy and Climate Plan (NECP), emphasizing integration with renewable sources and EU standards, although security risks may slow progress. The study recommends policy measures to ensure sustainable development.

Keywords*: electric vehicle charging stations, wartime conditions, infrastructure development, renewable energy integration, energy security, e-mobility prospects.*

Relevance of the Topic. In 2025, amid the ongoing military conflict with Russia, the development of the electric vehicle (EV) charging station network in Ukraine has acquired strategic significance. On the one hand, the war has caused severe damage to energy infrastructure, frequent power outages, and economic challenges that slow down network expansion. On the other hand, a 52% increase in EV imports in 2025 (up to 61,700 units from January to August) and global trends toward transport decarbonization are driving demand for charging infrastructure. The National Energy and Climate Plan (NECP) for 2025–2030 aims to achieve 14% of renewable energy sources (RES) in transport by 2030, where charging stations play a key role in reducing dependence on imported fuels and strengthening energy security. Martial law introduces unique challenges, such as the risks of cyberattacks and physical damage, but also opens opportunities for decentralized, RES-integrated solutions.

Existing Problems and Challenges. Before the full-scale invasion in 2022, Ukraine's EV charging network was developing dynamically: between 2018 and 2021, the number of stations grew from 500 to over 2,000, driven by private investment and government incentives such as VAT exemptions on EV imports. The war slowed this growth: in 2022–2023, expansion dropped by 30% due to energy system damage and logistical disruptions. However, recovery has been observed since 2024 – local production doubled to 22,700 units, and imports of equipment from China (covering 95% of the market) continued despite risks. Key industry players now manufacture smart charging stations designed to operate under unstable grid conditions — an adaptation to wartime realities.

As of July 2025, Ukraine has between 1,500 and 3,200 public charging stations, including 470 along national highways. The distribution remains uneven: more than 50% of stations are concentrated in Kyiv, Lviv, and Odesa, while the eastern and southern regions affected by the war have only 10–15% of the total. Fast charging stations (DC, 50 – 150 kW) make up about 20%, while the rest are slow chargers (AC, 7 – 22 kW). The market is generating revenues of around USD 319.9 million in 2025, with an annual growth rate of 5.17% (CAGR through 2030). Wartime impacts are reflected in frequent outages – over 3,100 attacks on the energy system between March and September 2025 caused temporary shutdowns of stations. However, decentralized solutions such as solar-powered chargers have helped maintain functionality.

Key Barriers to Network Development under Martial Law:

Infrastructure damage: Since 2022, Ukraine has lost over 40% of its generation capacity, leading to grid overloads and outages that complicate charging station operations. In eastern regions such as Dnipropetrovsk and Kharkiv, many stations remain inaccessible due to proximity to the front line.

High costs: The price of a fast charging station reaches €10,000 – 50,000, while a slow one costs €1,000 – 5,000, discouraging investment amid economic crisis. Inflation and limited financing further increase risks.

Lack of standards: The absence of unified connection and operation standards complicates grid integration. Heavy dependence on Chinese suppliers (95%) creates supply chain vulnerabilities.

Energy instability: Frequent blackouts (up to 2,000 hours annually in 2024) require backup systems such as batteries, increasing costs.

Regulatory and social barriers: Legislation mandates 5% of parking spaces for EVs in new buildings, but compliance remains low due to wartime priorities. Energy poverty also limits demand.

Research Results. Analysis of 2025 data shows positive market dynamics despite ongoing challenges. Key findings include:

Market growth: EV imports increased by 52%, with record registrations in September (12,100 units). Domestic production doubled, focusing on monitored, grid-adaptive charging systems.

Government initiatives: An interactive map for optimal charging station locations was launched, identifying gaps on routes over 40 km. The national network development concept is harmonized with the EU AFIR directive – fast chargers of 150 kW every 60 km along TEN-T corridors by 2025.

RES integration: The NECP foresees 320,000 tonnes of oil equivalent of renewable electricity for transport by 2030, with 16% allocated for EVs. Many charging stations are integrated with solar panels to ensure autonomy.

Global context: Ukraine could reach 20,000 stations by 2030, provided sufficient investment is secured.

Wartime adaptation: The sector contributes to job creation and fuel independence but still requires international financial and technical assistance.

Table 1

Key Statistical Indicators of the Electric Vehicle Charging Station Network in Ukraine (2023–2025)

Indicator	Value 2023	Value 2024	Forecast 2025
Public charging stations	~1,200 – 2,000	~1,500 –3,200	Expansion along highways
Highway charging stations	~300 – 400	~470	Significant growth planned
EV imports	~40,000	~50,000+	61,700 (January–August)
Market revenue (million USD)	N/A	N/A	319,9
Growth (CAGR)	N/A	N/A	5,17% (2025 – 2030)
Units produced	12,300	22,700	Doubling expected

Forecasts for 2025 – 2030 are optimistic: the charging network could expand to 20,000 stations, with a focus on fast chargers and integration with renewable energy sources (RES). Government measures, such as the development concept and the interactive mapping system, support effective planning. EU harmonization (AFIR) requires investment in 150 kW stations every 60 km. The wartime context stimulates autonomous solutions such as solar-powered chargers, although security risks may delay target achievement. International assistance, particularly from the EU, could accelerate recovery, creating employment opportunities and reducing emissions.

The network's expansion could stimulate the economy by generating 5,000 – 10,000 new jobs by 2030 and reducing fuel imports by 10%. Socially, EVs contribute to lowering pollution levels, though wartime poverty limits affordability and adoption. Inflation and the ongoing energy crisis necessitate subsidies to support large-scale implementation.

Conclusions. Ukraine's EV charging network demonstrates resilience, with growth potential up to 20,000 units by 2030, but the war requires adaptive strategies. Success will depend on sustained investment, regulatory improvement, and international support aligned with the National Energy and Climate Plan (NECP).

REFERENCE

1. Tereshenko, A. (2025). Analysis of modern electric vehicle charging systems using renewable energy sources and battery storage. *Vidnovluvana Energetika*, (3(82), 55-64. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).55-64
2. Law of Ukraine "On Certain Issues Regarding the Use of Vehicles Equipped with Electric Motors and Amendments to Some Laws of Ukraine on Overcoming Fuel Dependence and Developing Electric Charging Infrastructure and Electric Vehicles" dated February 24, 2023, No. 2956-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2956-20#Tex
3. Position Paper Charging Electric Vehicles Infrastructure in Ukraine. URL: https://euea-energyagency.org/en/news/market-news/position-paper-charging-electric-vehicles-infrastructure-in-ukraine/
4. Ukrainian ministry begins drafting concept for electric vehicle charging infrastructure URL: https://en.interfax.com.ua/news/general/1115862.html
5. Electric Vehicles Ukraine. URL: https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/ukraine

6. Ministry of Energy Launches Interactive Map of Optimal Locations for Electric Vehicle Charging Stations. URL: https://mev.gov.ua/en/news/ministry-energy-launches-interactive-map-optimal-locations-electric-vehicle-charging-stations
7. Steffen. B., Patt, A (2022). A historical turning point? Early evidence on how the Russia-Ukraine war changes public support for clean energy policies. Energy Research & Social Science, 91, 102758. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102758

UDC 629.349:62-82:519.876.5

O.O. Beshta[1], O.M. Plahunov[1]
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE PRINCIPLE OF OPERATION OF AN ELECTRIC VEHICLE PLATFORM BASED ON OMNIDIRECTIONAL MECANUM WHEELS

Abstract. This work is devoted to studying the principle of movement of an electric vehicle platform based on omnidirectional Mecanum wheels, which enable movement in any direction without changing the orientation of the body. A kinematic model is presented that describes the correlation between wheel speeds and the platform's trajectory to improve the accuracy and maneuverability of the system. An analysis of the state of the industry in Europe and Ukraine is provided.

Keywords: *electric vehicle, omnidirectional wheels, trajectory, mathematical modeling, Mecanum wheels, motion analysis.*

Introduction. The rapid development of electric transport, autonomous mobile systems, and robotics necessitates the improvement of motion systems that provide high maneuverability, stability, and energy efficiency. One promising direction is the use of electric vehicle platforms based on omnidirectional (omni- or Mecanum) wheels, which allow movement in any direction without changing the orientation of the body. This property is especially important for mobile robots, folding carts, autonomous transport systems, and intelligent logistics complexes.

Problem statement.

• Investigate the principle of operation
• Investigate the kinematic model of an electric vehicle platform with Mecanum wheels.
• Conduct an analysis of the industry in Ukraine and Europe.

Main content of the work.

An autonomous omnidirectional mobile platform designed for logistics operations in warehouses where space is limited. The design of Mecanum wheels allows for a smaller turning radius of the robotic platform.

Each wheel of the omnidirectional platform is equipped with an individual electric drive, which allows for independent control of its angular velocity and direction of rotation. This design feature allows for precise control of the platform's

movement in multidimensional control mode, ensuring high maneuverability and stability during movement. Independent control of the drives contributes to the formation of the necessary vectors of translational and rotational motion, which is critically important for tasks of precise positioning and coordination of movements in complex spatial conditions [1].

The design of Mecanum wheels involves the placement of rollers at an angle of 45° (Figure1) to the plane of wheel rotation, which causes a component of the force of motion to arise in a direction perpendicular to the wheel axis. This allows the platform to move not only forward and backward, but also sideways and diagonally without changing the orientation of the body. This kinematic principle provides omnidirectional movement and is the basis for smooth and continuous trajectory control in mobile robotics systems [1].

Figure1. Omnidirectional Mecanum wheel

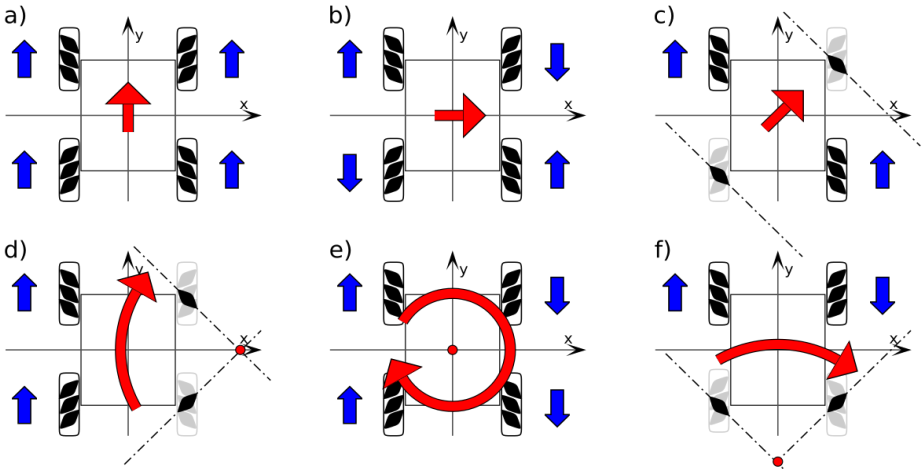


Fig. 2. Diagram of platform movement based on omnidirectional wheels. Blue: wheel movement direction; red: vehicle movement direction [2].

The kinematic characteristics of the platform's movement are determined by the type of omnidirectional wheels used. For Mecanum wheels, an inverse kinematic

model is used, which calculates the individual angular velocities of each wheel based on the specified linear and angular velocities of the platform's movement. The movement diagram of a platform based on omnidirectional wheels is shown in Figure 2 [3].

Mathematically, the movement of the platform is described by three degrees of freedom in the plane: translational velocities $\dot{x}$, $\dot{y}$ and angular velocity $\dot{\theta}$ around the vertical axis. Depending on the specified speeds of movement, the control system generates the necessary angular speeds of wheel rotation $\dot{\varphi}_i$, where $i = 1,2,3,4$. The inverse kinematic model, which determines the relationship between the desired speeds of the platform and the angular speeds of individual wheels, is as follows (Equation 1) [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \\ \dot{\varphi}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(a+b) \\ 1 & 1 & (a+b) \\ 1 & 1 & -(a+b) \\ 1 & -1 & (a+b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{1}$$

where r – is the wheel radius, a and b – re the distances from the center of the platform to the wheel axes along the x and y coordinates, respectively.

For motion inverse estimation tasks, a direct kinematic model is used, which allows determining the actual platform speeds based on the known wheel rotation speeds. It is written as (Equation 2) [5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -\frac{1}{a+b} & \frac{1}{a+b} & -\frac{1}{a+b} & \frac{1}{a+b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \\ \dot{\varphi}_4 \end{bmatrix} \tag{2}$$

In this model, the calculation is based on the pseudo-inverse Moore–Penrose matrix, which minimizes errors in the case of redundancy of degrees of freedom. These equations allow both controlling the movement of the platform and estimating its position in space based on measurements from wheel encoders.

According to a report on the omnidirectional robot market [6], the European market for omnidirectional wheeled platforms accounts for 21% of the global market, or $441 million in 2024. The main industries contributing to the implementation of these technologies are automotive, logistics, and healthcare, with Germany, France, and the United Kingdom leading the way.

According to the State Statistics Service of Ukraine [7], the degree of robot implementation in Ukrainian enterprises is reflected in the share of enterprises in the manufacturing industry that use industrial robots and robotics. In particular, in 2023, the share of enterprises using industrial robots was 4.4%, and the share of enterprises using robotics was 7.2%.

As can be seen from the data presented, the level of automation of enterprises in Ukraine is significantly lower than in Europe. The further development of electric vehicle platforms based on omnidirectional Mecanum wheels in the Ukrainian industrial sector could be an important step towards increasing the level of automation, optimizing logistics processes, and creating competitive high-tech solutions that meet the requirements of modern industry.

Scientific novelty

A kinematic model of omnidirectional platform motion is presented, taking into account the spatial parameters of Mecanum wheels. The application of the pseudo-inverse Moore–Penrose matrix to improve the accuracy of calculations in the case of drive redundancy is considered. The feasibility of independent control of each wheel to ensure high maneuverability and stability of movement is justified. The feasibility of introducing electric vehicle platforms at Ukrainian enterprises is justified.

Research results

The omnidirectional electric vehicle platform with Mecanum wheels allows movement in any direction without changing the orientation of the body. The use of inverse and direct kinematic models allows for effective motion control and precise positioning. The researched model is the basis for the creation of mobile robotic systems and logistics platforms of a new generation. Based on the analysis of the industry, it can be concluded that the implementation is feasible.

REFERENCE

1. Omnidirectional mobile robots, mechanisms, and navigation approaches from https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103958
2. The principle of Mecanum wheel control from: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Mecanum_wheel_control_principle.svg
3. Wheeled mobile robots: a review of the current state and kinematic comparison of three omnidirectional mobility strategies from 106:57 https://doi.org/10.1007/s10846-022-01745-7
4. Design and implementation of an integrated control system for omnidirectional mobile robots in industrial logistics fromhttps://doi.org/10.3390/s23063184
5. Röhrig, C., & Heß, D. (2019). OmniMan: Omnidirectional Mobile Manipulator for Human-Robot Collaboration. Proceedings of the International Multi-Conference on Engineering and Computer Science (IMECS 2019), Hong Kong. DOI: 10.48550/arXiv.331438557
6. Omni-directional Robots Market Research Report 2033 URL: https://growthmarketreports.com/report/omnidirectional-robots-market?utm_source=chatgpt.com
7. “Use of Information and Communication Technologies in Enterprises,” State Statistics Service of Ukraine URL: https://stat.gov.ua/uk

УДК 355.233.21

В.А. Бородай[1], Р.О. Боровик[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СИМУЛЯТОР FLUIDSIM ЯК ЗАСІБ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ З МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

Анотація. Матеріали публікації призначені для ознайомлення широкого загалу з досвідом використання віртуальних систем у навчальному процесі, що є особливо актуальним в умовах дистанційного навчання. Обґрунтовано ефективність застосування симулятора FluidSIM для формування практичних навичок, що наближаються до реальних виробничих умов. Наведено приклади використання FluidSIM для електропневматичних і електричних схем керування, що демонструють можливість повноцінного навчання без наявності фізичного обладнання. Визначено педагогічні переваги моделювання та перспективи інтеграції FluidSIM із системами керування Festo Didactic.

***Ключові слова**: мехатроніка, FluidSIM, симуляція, електропневматика, дистанційне навчання, віртуальна лабораторія.*

Вступ. У сучасних умовах цифрової трансформації освіти підготовка фахівців з мехатроніки вимагає використання інноваційних засобів навчання. Пандемія COVID-19, а також воєнний стан в Україні зумовили необхідність переведення навчального процесу у дистанційному форматі. Для технічних спеціальностей, де практична складова має ключове значення, виникла потреба у створенні віртуальних лабораторій. Одним із найефективніших інструментів для цього є програма FluidSIM, що поєднує графічне проектування, симуляцію та інтерактивне навчання.

Мета роботи – є обґрунтування педагогічної та технічної ефективності використання програми FluidSIM у навчальному процесі підготовки майбутніх фахівців з мехатроніки. Для досягнення мети необхідно розглянути функціональні можливості програми, описати методику її застосування у навчанні електронних та електропневматичних систем, а також визначити переваги й обмеження використання симуляційного підходу порівняно з традиційними лабораторними заняттями.

Основний зміст роботи.

Використання віртуальних лабораторій розглядається у працях українських і зарубіжних науковців як важливий чинник розвитку технічної освіти. У дослідженні джерела [4] підкреслюється, що впровадження віртуальних технологій підвищує якість підготовки інженерів-електриків, забезпечуючи безпечне середовище для експериментів і можливість самостійної перевірки результатів моделювання. Подібні висновки містяться у працях Сташкевича П.М. та Лукінюка М.В. [5], які наголошують на ефективності симуляційних засобів для вивчення пневматичних і логічних систем.

Особливо цінним досвід використання FluidSIM у навчальному процесі виявився під час карантинних обмежень та у період воєнного стану. Завдяки універсальності програми її використовують для моделювання пневматичних, гідравлічних, електричних та електронних систем. Програма дозволяє створювати схеми будь-якої складності, досліджувати їхню роботу, контролювати параметри, а також діагностувати помилки у режимі реального часу.

Технології FluidSIM успішно використовуються у дисциплінах «Основи мехатронних систем», «Системи керування електроприводами» та «Мехатронні комплекси та системи». у рамках дисципліни «Основи мехатронних систем» студенти виконують лабораторну роботу з теми «Електропневматичне керування двоциліндровим приводом» (рис. 1).

Мета роботи – ознайомлення з принципом побудови електропневматичних систем і розробка схеми керування послідовною роботою двох циліндрів двосторонньої дії та за наявності датчиків. У FluidSIM створюється схема, що складається з двох циліндрів, електромагнітних 5/2-розподільників, кнопок пуску і зупинки, датчиків, джерела живлення та логічних елементів. Після запуску симуляції користувач може керувати роботою схеми, спостерігати послідовність спрацьовування циліндрів і зміну станів електричних сигналів. Таке моделювання дозволяє ознайомитись з принципами роботи і використанням різних типів датчиків, дослідити вплив параметрів елементів на роботу системи.

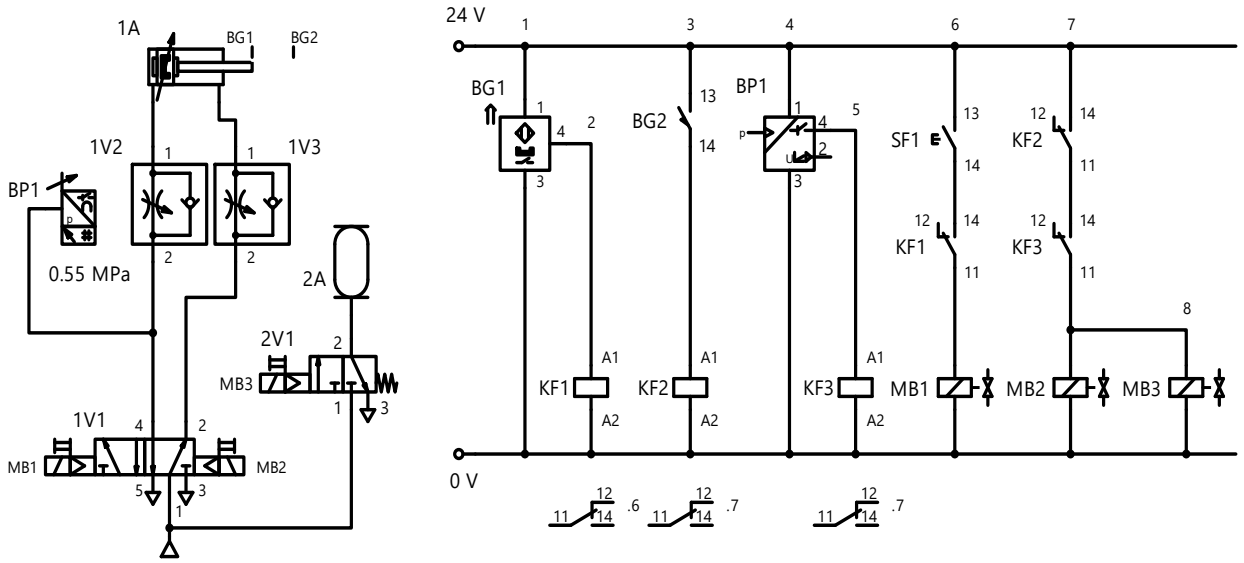
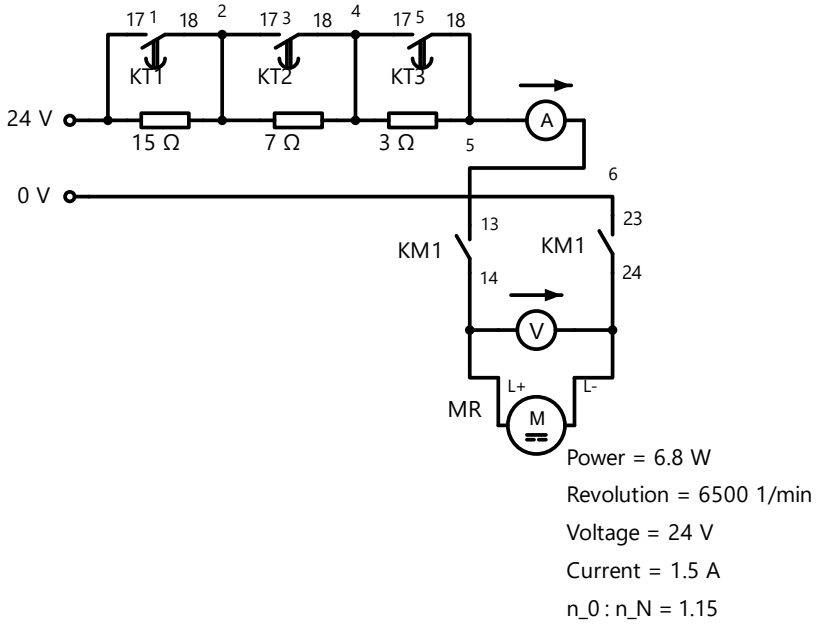


Рис. 1. Приклад електропневматичної

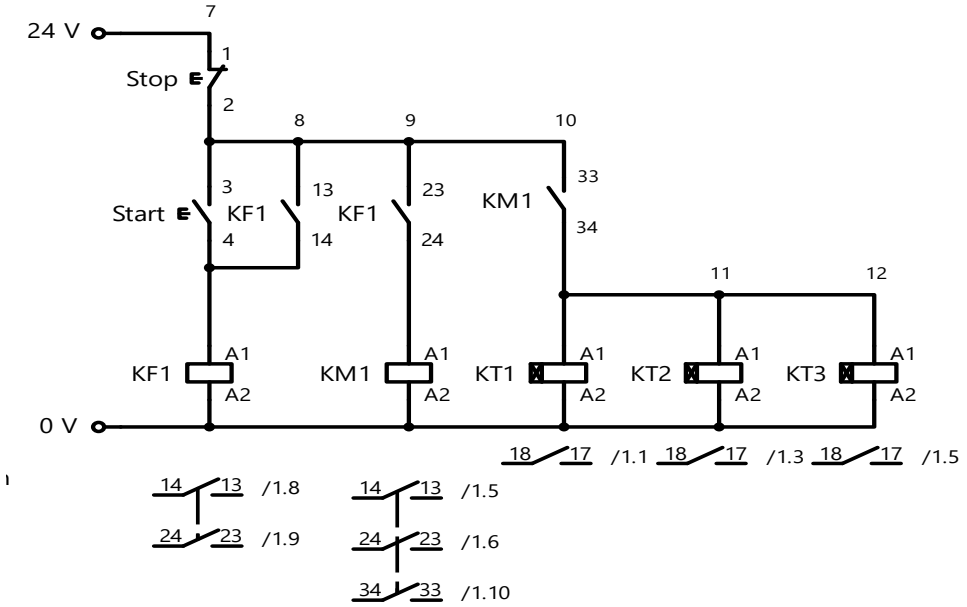
Аналогічно вивчаються схеми з електроніки: наприклад, схема генератора імпульсів на транзисторах, що подає сигнали на електроклапани. У процесі симуляції студенти аналізують форму сигналів за допомогою віртуального осцилографа FluidSIM, що сприяє кращому розумінню динаміки процесів.

Поєднання електроніки, пневматики та контролерів в межах однієї моделі допомагає усвідомити принципи побудови мехатронних систем.

Програмна платформа FluidSIM приділяє особливу увагу вивченню систем керування електричними приводами. Як приклад може бути наведено модель і її симуляція для ступінчастого способу запуску двигуна постійного струму (рис. 2), де результат моделювання ілюструється на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Схема електрична принципова ступінчастого пуску ДПС:
а) – силова схема і б) – схема керування

Модель приводу дає змогу здобувачу освіти отримати наочний досвід щодо принципу побудови та послідовності роботи автоматизованої системи керування ДПС, а крім того осцилограми додатково демонструють графіки перехідних процесів, які закріплюють теоретичну та практичну базу навчання.

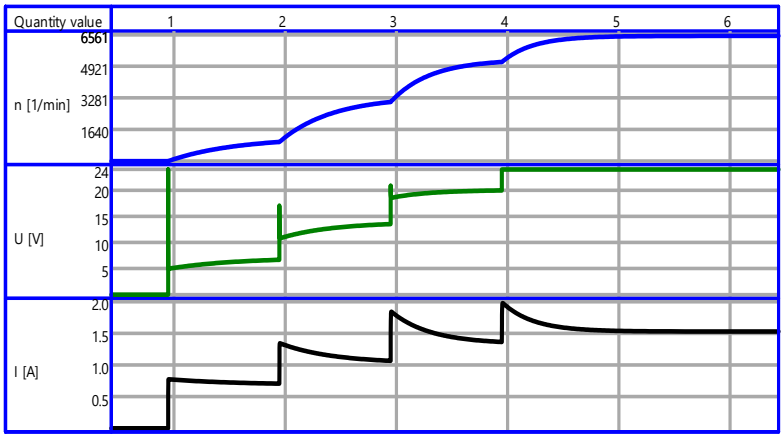


Рис. 3. Графік перехідного процесу ступінчастого пуску ДПС

Таким чином, застосування FluidSIM у навчальному процесі дало змогу забезпечити безперервність освітнього процесу під час дистанційного навчання. За результатами опитування студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» 87% відзначили підвищення мотивації до навчання завдяки інтерактивним можливостям симулятора. Автори публікації зазначають, що час на пояснення лабораторних завдань скоротився на 25%, а кількість помилок у звітах зменшилась удвічі. Серед переваг студенти називають наочність процесів, можливість безпечного експерименту та індивідуальну роботу з моделлю.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації педагогічних прийомів використання FluidSIM для формування професійних компетентностей майбутніх фахівців з мехатроніки. Запропоновано методичну модель інтеграції симуляційного навчання з практичними заняттями у лабораторіях Festo Didactic, що підвищує якість інженерної підготовки.

Висновки.

1. FluidSIM є універсальним засобом для навчання основ мехатроніки, електроніки та електропневматики у дистанційному форматі.
2. Використання симуляційного середовища забезпечує безпечне відтворення реальних процесів і формування практичних навичок без фізичного обладнання.
3. Поєднання реальних і віртуальних лабораторій сприяє розвитку творчого мислення та технічної компетентності студентів.
4. Подальший розвиток методики передбачає інтеграцію FluidSIM із ПЛК-контролерами Siemens та системами MATLAB/Simulink для створення комплексних навчальних тренажерів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Festo Didactic SE. FluidSIM 6 User's Guide. – Denkendorf : Art Systems Software GmbH, 2021. – 475 p.
2. Art Systems Software GmbH. FluidSIM – Simulation of Pneumatic, Hydraulic, and Electrical Circuits [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.art-systems.de/www/site/en/fluidsim/
3. Festo Didactic. Віртуальне моделювання та симуляція FluidSIM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.festo.com/ua/uk/e/tiekhnichna-osvita/tsifrovie-navchannia/virtual-nie-modieliuvannia-ta-simuliatsiia/fluidsim-id_1663056/
4. Бородай В.А., Нестерова О.Ю., Ковальов О.Р., Боровик Р.О. Досвід застосування віртуальних технологій в забезпеченні якості освіти інженерів-електриків. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. – 6 с.
5. Сташкевич П.М., Лукінюк М.В. Технічні засоби автоматизації. Математичні операції на пневматичних елементах та їх використання в системах керування : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 319 с.
6. Самородов В.Б., Аврунін Г.А., Кириченко І.Г. Гідро- та пневмосистеми в автотракторобудуванні : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 524 с.
7. Основи мехатронних систем: лабораторний практикум / [уклад. кафедри мехатроніки]. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. – 72 с.
8. Technical Education in the Digital Age : монографія. – Київ : ІІТТО НАПН України, 2023.

УДК 621.313

O.S. Bieliaiev[1]
[1]Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine

PREVENTION OF FRICTION-INDUCED SELF-OSCILLATIONS AND ENSURING THE SPECIFIED QUALITY INDICATORS OF A TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH A QUASI-NEUROREGULATOR

Abstract. A regulator for electromechanical electric drive systems, which is based on simplified structure of neural network, called a «quasi-neuroregulator» is reviewed. This regulator provides effective elimination of frictional self-oscillations that arise due the nonlinear nature of friction. Computer modeling of a two-mass electromechanical system with an elastic kinematic connection and a nonlinear frictional load confirmed the ability of the proposed regulator to eliminate the occurrence of frictional self-oscillations. A significant increase in the speed of modern microprocessors and of encoders resolution create conditions for practical use of quasi-neuroregulators in electric drive systems of machines and mechanisms in electric transport vehicles.

***Keywords**: electromechanical system, electric drive, electric vehicles, stability, self-oscillations, frictional load, quasi-neuroregulator, control, simulation, regulator.*

Introduction. Electromechanical systems, in particular automated electric drives of machines and mechanisms, play an important role in electric vehicles. With the rapid development of the electric vehicle industry, a universal electric drive system is becoming a key technology for accelerating the advancement of the electric mobility sector.

There exists a broad class of electric drives for machines and mechanisms that can be represented as a two-mass electromechanical system (EMS) with an elastic kinematic coupling and a nonlinear frictional load, including electric vehicles, and many others in which the load characteristic under slipping or sliding modes corresponds to a friction pair [1, 2]. Under such conditions, the mechanical characteristic of the electric drive contains a so-called «negative-slope» region, where an increase in sliding velocity results in a decrease in the friction coefficient. As a consequence, friction-induced self-oscillations (FISO/AKF) may arise; these oscillations are either unacceptable or significantly deteriorate process performance by reducing surface finish and machining accuracy, increasing energy losses, and in some cases causing failures of kinematic components.

Considering the multiplicative and synergistic effects, the elimination of friction-induced self-oscillations and their negative consequences yields a substantial potential for energy resource saving. The suppression of FISO is achieved within automatic control systems of electric drives. One of the means for mitigating FISO is the quasi-neuroregulator (QNR), originally proposed in 2006 [3].

The purpose of the work is the computer modeling, in modified generalized dimensionless parameters, of a two-mass electromechanical system with an elastic coupling, a nonlinear frictional load, and a quasi-neuroregulator, in order to investigate the dynamic processes in the system and to evaluate the effectiveness of the quasi-neuroregulator in suppressing friction-induced self-oscillations.

Problem statement. Using a simplified neural network structure (without hidden layers) and measuring only a single output coordinate, derive the expressions for the weighting coefficients and design a controller that ensures the required control performance. Ensure the universality of the obtained relations for each of the linearized regions of the frictional load by employing modified generalized dimensionless parameters [4].

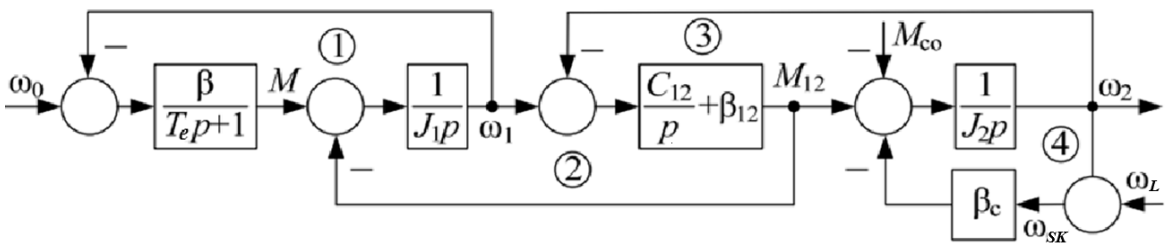
Main content of the work. To achieve the stated objective and address the research tasks, the following methods were employed: a review of the relevant literature; the method of linearizing nonlinear characteristics while preserving their «large-scale» nonlinearity; mathematical modeling in structural form using physical and modified generalized dimensionless parameters; the topological method for determining the system's transfer function and characteristic polynomial; the D-decomposition method for deriving analytical expressions for stability boundaries; the polynomial synthesis method for obtaining the coefficients of the complementary polynomial; the finite-difference method; and computer-based modeling in the MATLAB/Simulink environment [5].

Structural diagrams of the analyzed electromechanical system are given in physical parameters (as an object of regulation) (Fig. 1a) and modified generalized dimensionless parameters of the system with a quasi-neuroregulator (Fig. 1b) [6].

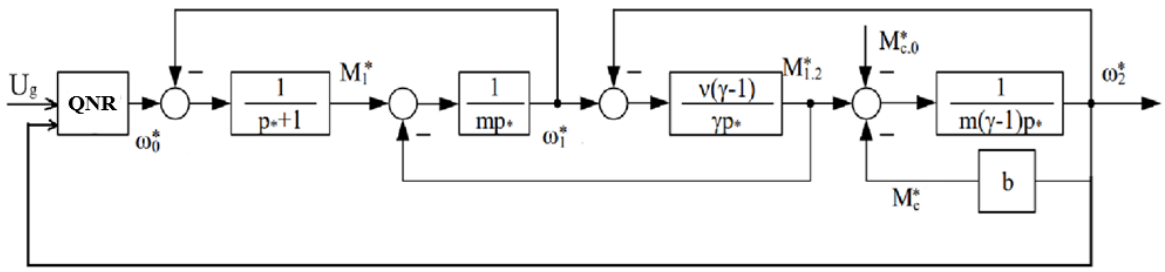
It is assumed that the system parameters are reduced to the speed of the electric motor. A dimensionless generalized representation of the system parameters is used,

which allows to significantly reduce the number of physical parameters taken into account during synthesis and gives the obtained results a more universal character:

- ω_0^* – no-load angular velocity of the electric motor;
- M^* – torque of the electric motor;
- ω_1^* – angular velocity of the motor shaft;
- M_{12}^* – elastic torque;
- m – ratio of electromechanical to electromagnetic time constants, $m = \frac{T_M}{T_e}$;
- γ – is the mass ratio coefficient, $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$;
- ν – ratio of the squares of the frequencies of undamped mechanical and ω_2^* – angular velocity of the second mass.
- electromechanical resonances, $\nu = \frac{\Omega^2_{12}}{\Omega^2_{EM}}$;
- b – the ratio of the stiffness of the linearized section of the mechanical characteristic of the load to the stiffness modulus of the mechanical characteristic of the electric drive, $b = \frac{\beta_S}{\beta}$;
- p_* – is the differentiation operator in dimensionless form , $p_* = p \cdot T_e$.



a



b

Fig. 1. Structural diagram of EMS with frictional load in physical parameters (a); modified generalized dimensionless parameters of the system with a quasi-neuroregulator (b)

For basic values for the coordinate system let's choose general known: for angular speeds – idling speed of the electric motor ω_0; for moments – short circuit moment M_{*KZ}.

The model assumes a closed-loop control through the QNR block, which receives the value of ω_2^*, computes the discrete convolution with weighting coefficients (W_1–W_4), and generates the control signal U^*.

The model includes the following components: an aperiodic link representing the electromechanical energy conversion of the motor; two integrating blocks for the masses with different inertias; an elastic coupling between the masses; determination of the operating point on the negative-slope region of the load characteristic; and feedback via the quasi-neuroregulator.

The model is constructed as a block diagram in modified generalized dimensionless parameters, which ensures the universality of the simulation results for different types of machines and mechanisms.

When analyzing and synthesizing electric drive systems, the load characteristic of the «friction pair» type is usually assumed to be such that it corresponds to «dry» friction, i.e. its value does not change within one direction of motion. It is known that under some conditions (slipping, yaw), it has a nonlinear dependence on the sliding speed with characteristic sections that can be linearized with sufficient accuracy for practical purposes , as shown in Fig. 2. In this case, the nonlinearity of friction in the «large» is provided by approximating its characteristic sections with linear segments.

In Fig. 2: I – elastic sliding section; II – falling section; III – Mc ≈ const ; IV – slowly rising section.

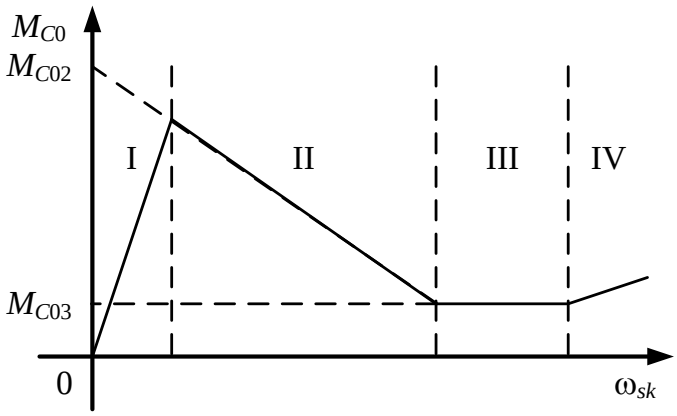


Fig. 2. Frictional load characteristics

With the accepted assumption, the equation of the mechanical characteristic of the load has the form $M_c = M_{c0} + \beta_S\omega_S$. It is worth noting that in section II the stiffness of the mechanical characteristic of the load β_S can be negative, which creates dynamic instability of the open system. Linearization of the friction characteristic ensures the universality of the obtained analytical relations when determining the weight coefficients for any of its sections.

The adequacy of the theoretical provisions set forth and the obtained relationships will be verified by computer modeling [7]. The scheme of the computer model in the Matlab package is presented in Fig. 3.

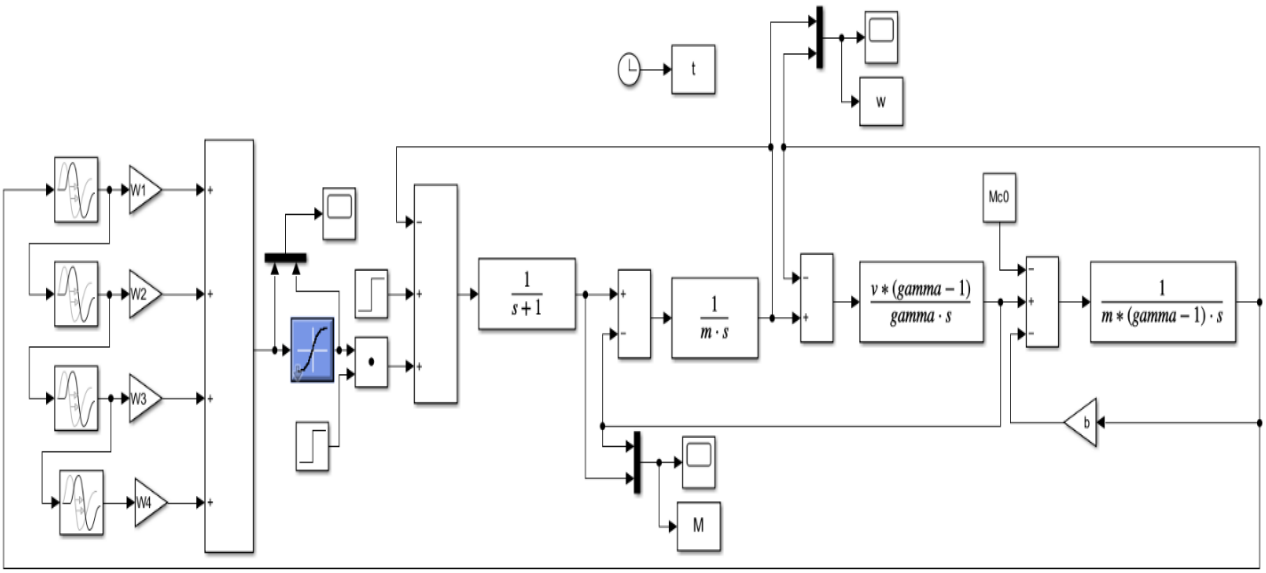


Fig. 3. Computer model of a two-mass electromechanical system in modified generalized dimensionless parameters with quasi-neuroregulator in the Matlab package

In this diagram, the designations of the elements are consistent with the diagram of the system under study (Fig. 1b) and the principle of operation of the quasi-neuroregulator.

We will establish the simulation modes based on the need to eliminate frictional self-oscillations (FISO/AKF) using a quasi-neuroregulator. Their occurrence is a consequence of the appearance of a divergent oscillatory process when moving the operating point along the falling section of the friction characteristic. The growth of the amplitude is limited when moving the operating point to the rising section. That is, if the controller eliminates the divergent process on the falling section, then the AKF will not arise. The stiffness of the mechanical characteristic of the load on the falling section has a negative sign, so we will carry out the simulation with negative values of the parameter *b*.

1) For the values b =-0.01, m =2.887, γ =1.2, v =10, which corresponds to a point on the stability limit, which in turn corresponds to a conservative system (Fig. 4).

2) For the values b =-0.1, m =2.887, γ =1.2, v =10, which corresponds to a point beyond the stability limit, which in turn corresponds to a divergent oscillatory process (Fig. 5).

Results modeling also confirm elimination divergent oscillating process, which in a nonlinear system leads to friction self-oscillations.

Let us analyze the correspondence of the obtained time diagrams to the physical essence of the processes occurring during modeling.

The jump-like task of the control signal (Fig. 4) causes a rapid increase in the torque of the electric motor with a transition to a non-damping oscillatory process of the speed of the second mass, which corresponds to the location of the selected parameters on the stability limit. Connecting a quasi-neuroregulator at the 29th unit of

dimensionless time quickly eliminates the oscillatory process and ensures stabilization of the speed and moment. A similar action of the regulator occurs when eliminating a divergent oscillatory process (Fig. 5).

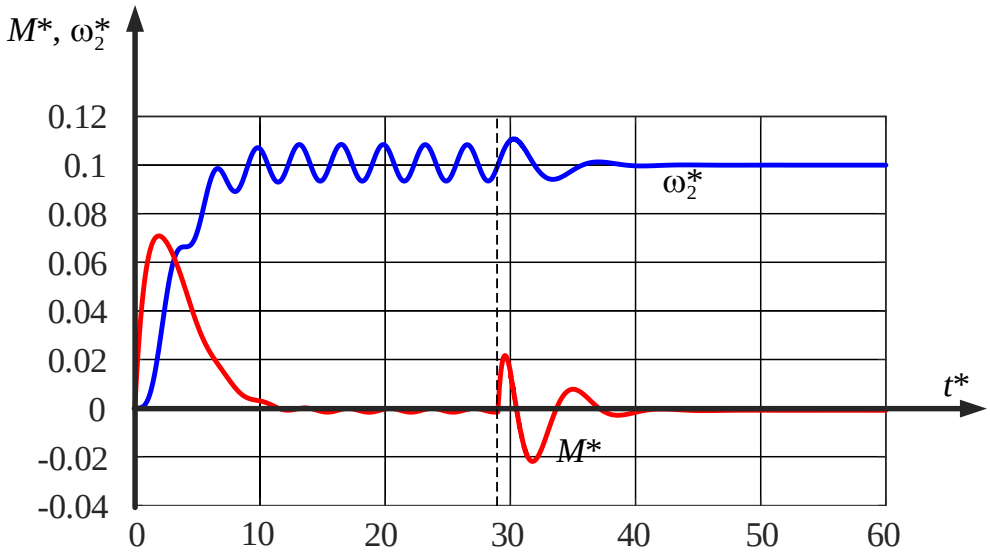


Fig. 4. Connection of the QNR in the steady self-oscillatory regime at the phase with zero mean value, $t^* = 29$

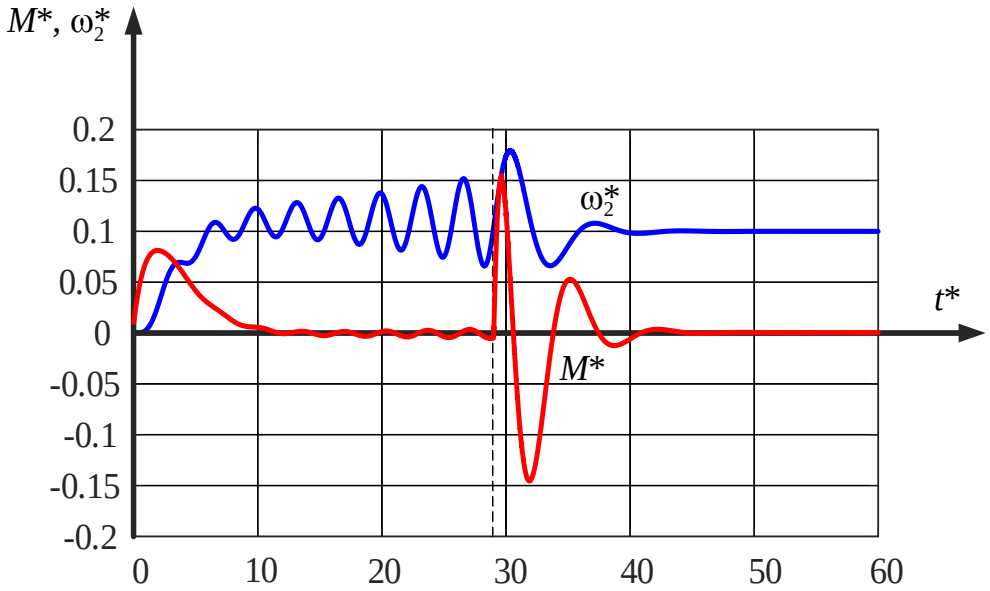


Fig. 5. Connection of the QNR during a diverging self-oscillatory process at the phase with zero mean value, $t^* = 29$

Thus, computer modeling in generalized parameters showed full compliance of the expected nature of the processes according to the theoretical provisions.

Conclusions. Computer modeling confirmed the efficiency of the quasi-neuroregulator in terms of eliminating frictional self-oscillations that arise when the operating point moves along the incident section of the friction characteristic. The proposed structure of the quasi-neuroregulator requires measurement of only one phase

coordinate - the velocity of the second mass, eliminates the need for middle layers of neurons and multiple computer iterative calculations of a significant number of weight coefficients. The obtained analytical expressions are universal in nature and are valid for any of the typical linearized sections of friction nonlinearity. The rapid growth of processor speed and increased encoder resolution create conditions for the practical use of the proposed regulator and its use for increasing the operational efficiency of electric vehicles.

REFERENCES

1. Hirani H. Fundamentals of Engineering Tribology with Applications. Cambridge : Cambridge University Press, 2016. 442 p.
2. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 358p.
3. Quasi-neuroregulator for an Electromechanical System: Declaration Patent 12362, Ukraine; IPC G05B 11/01, G05B 5/00; No. u200503304; filed 11.04.2005; published 15.02.2006, Bulletin No. 2, 6 p.
4. Klepikov V. B. Dynamics of Electromechanical Systems with Nonlinear Friction: Monograph. Kharkiv: Textbook, NTU KhPI, 2014. 408 p.
5. Klepikov V.B., Bieliaiev O.S., Obruch I.V. Synthesis of a Two-Mass Electromechanical System with a Simplified Structure Neuroregulator and Nonlinear Frictional Load // *Technical Electrodynamics*. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, 2025. No. 4. P. 51–61.
6. Obruch I. V., Khoreva A. V. A New Model of a Two-Mass Electromechanical System in Generalized Parameters. Bulletin of the National Technical University «KhPI» Special Issue: Problems of Automated Electric Drives. Theory and Practice. 2015, No. 12 (1121), pp. 160–163.
7. Bieliaiev O.S. Simulation of Dynamic Modes of a Two-Mass Electromechanical System with a Quasi-Neuroregulator // *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2024. No. 11(202). P. 147–164.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Абраменков Костянтин Миколайович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Абрамов Артем Станіславович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» група САа-25-10 кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Азюковський Олександр Олександрович – к.т.н., доцент, професор кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Алексєєв Михайло Олександрович – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Алексєєв Олексій Михайлович – к.т.н., доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Алексєєв Михайло Олексійович – магістр групи 122м-25-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Алімов Віталій Олександрович – магістр групи 121м-24-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Антіпов Максим Михайлович – студент групи АВ-25-1м кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Атаманчук Олександра Анатоліївна – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бабець Дмитро Володимирович – д.т.н., професор, професор кафедри прикладної математики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Байдашний Єгор Станіславович – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Берднік Михайло Геннадійович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бешта Олександр Степанович – член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бешта Олександр Олександрович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бешта Лілія Валеріївна – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бєляєв Олег Сергійович – PhD, асистент кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Біліба Богдан Сергійович – студент групи 123м-24-1кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Битько Андрій Миколайович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бородай Валерій Анатолійович – к.т.н., доцент**,** доцент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Боровик Роман Олексійович – старший викладач кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бубліков Андрій Вікторович – д.т.н., професор, завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Бурлака Олександр Сергійович – магістр групи 122м-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Васенко Роман Олександрович – студент групи АВ-23-1б кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Вдовиченко Руслан Сергійович – магістр групи ІТм-25-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Візнюк Артем Валентинович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Васенко Р.О. – студент групи АВ-23-1б кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Волошин Дмитро Андрійович – бакалавр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Вялушкін Семен Олегович – магістр групи 121м-24-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гаркуша Ігор Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Герасименко Ілля Юрійович – аспірант групи АРа-25-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гнатушенко Володимир Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Голінько Олександр Васильович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Горбова Олександра Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Горченко Михайло Володимирович – магістр групи 121м-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Григорян Сергій Валерійович – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Грушко Єгора Олександровича – магістр групи 122м-21-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гуліч Ігор Петрович – магістр групи ІТм-25-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гулівець Микола Олександрович – аспірант групи ПМа-25-10 кафедри прикладної математики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гурбанов Руслан Аламдарович – аспірант групи 174А-23-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Гурковська Світлана Сергіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Дмитрієва Ольга Анатоліївна – д.т.н., професор, Дослідницький центр моделюючих технологій (SimTech) університету Штутгарта, Інститут моделювання водно-екологічних систем університету Штутгарта, Німеччина.

Добряк Сергій Костянтинович – к.т.н., доцент, доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Довбиш Ольга Андріївна – магістр групи 125м-23-1 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Донченко Євгеній Іванович – к.т.н., старший викладач Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Тернопіль, Україна.

Дубіна Єгор Сергійович – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Дяченко Григорий Григорійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Єрмаков Владислав Віталийович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Желдак Тимур Анатолійович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри системного аналізу та управління, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Запишний Олександр Олександрович – аспірант кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Зибалов Дмитро Сергійович – аспірант групи 151А-22-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Зубенко Сергій Євгенійович – аспірант групи 174А-24-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Зубков Михайло Юрійович – магістр групи 125м-24-1 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Іванов Денис Валерійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Іванченко Олег Васильович – д.т.н., доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Іванчишина Світлана Василівна – студентка групи ЕІ-23-1п кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Ільяшенко Ілля Олегови – студент групи КН-24-1м кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Ісаєв Андрій Борисович – старший викладач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Іщук Павло Олександрович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кабак Леонід Віталійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кавац Олена Олександрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Кавац Юрій Віталійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Калінкін Богдан Павлович – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Карабеза Валерій Володимирович – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Карапиш Олег Віталійович – аспірант групи АРа-25-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Карпенко Олег Вікторович – к.т.н., доцент, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Карпов Олександр Володимирович – аспірант групи 174А-23-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Касьянюк Олександр Сергійович – старший викладач кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна

Каштан Віта Юріївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кириченко Марина Сергіївна – старший викладач кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кириченко Ганна Володимирівна – к.т.н., доцент кафедри електропривола НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Клименко Антон Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Книш Владислав Олегович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Електрична інженерія», кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Козачук Кирило Валерійович – аспірант групи АРа-25-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кожевников Антон Вечеславович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Колісник Костянтин Дмитрович – аспірант кафедри комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском, НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Колб Андрій Антонович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Корнієнко Валерій Іванович – д.т.н., професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Корольов Роман Володимирович – к.т.н, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Кочева Софія Миколаївна – студентка групи 122-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кошеленко Євгеній Валерійович – к.т.н., доцент, декан електротехнічного факультету, доцент кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

Койфман Олексій Олександрович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Кривокоритов Андрій Володимирович – аспірант кафедри системного аналізу та управління, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Круглик Андрій Сергійович – аспірант гр. 121А-23-5 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Кручінін Олександр Володимирович – старший викладач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Куваєв Микола Володимирович – к.т.н., науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро, Україна.

Кузнецов Олег – аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Курандо Олексій Ігорович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Куршубадзе Тамара Ревазівна – магістр групи ІТм-25-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Куць Максим Олегович – магістр групи 125м-24-1 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Лактіонов Іван Сергійович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Лисенко Олександра Геннадіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Лисиченко Інеса Юріївна – студентка групи 122-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Литвинчук Олександр Віталійвич – аспірант групи ЕЕА-25-10 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Лубенець Данило Євгенович – програміст ТОВ «ЛЮКСОФТ-Україна», м. Київ, Україна.

Луценко Іван Миколайович – к.т.н., доцент, професор кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

Малишко Максим Михайлович – аспірант кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», в.о. головного енергетика АТ «Нікопольський завод феросплавів», м. Дніпро, Україна

Мартиненко Андрій Анатолійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

Масик Владислав Володимирович – магістр групи АВП-25-1мн Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Тернопіль, Україна.

Мацюк Сергій Михайлович – к.т.н., доцент, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Мещеряков Леонид Іванович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Мірошниченко Вікторія Ігорівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Мірошниченко Сергій Олександрович – аспірант, старший викладач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Мироненко Ольга Василівна – студент групи КН-24-1м цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Молодець Богдан Володимирович – доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Молоканова Валентина Михайлівна – д.т.н., професор, професор кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Мовлик Дмитро Дмитрович – здобувач групи ІТм-25-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Мороз Борис Іванович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Мороз Дмитро Максимович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

М'якенький Арсеній Вячеславович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Нікулін Сергій Леонідович – д.г.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Новицький Ігор Валерійович – д.т.н., професор, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Одновол Микола Миколайович – доцент кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Олевський Віктор Ісаакович – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Олішевський Ілля Геннадійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Опанащук Марія Володимирівна – магістр групи АВ-25-1м кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Панченко Марина Віталіївна – студент групи КН-25-1м цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Папаїка Юрій Анатолійович – д.т.н., професор, завідувач кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Пащенко Володимир Русланович – студент групи 121м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Пащенко Іван Анатолійович – магістр групи 172м-23з-1 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Перченко Антон Віталійович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Автоматизація» кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Півняк Геннадій Григорович – академік НАН України, д.т.н., професор, Голова Вченої ради НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Плагунов Олексій Михайлович – аспірант, здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Електрична інженерія» кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Плуталов Ярослав Андрійович – студент групи КН-24-1м кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Плєснецов Сергій Юрійович – д.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Плєснецов Юрій Олександрович – к.т.н., старший науковий співробітник, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Приходченко Сергій Дмитрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Приліпко Ксения Геннадіївна – магістр групи 122м-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Продан Богдан Шихахмедович – аспірант групи 174А-23-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Проценко Віталій Олександрович – студент групи 014-23-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Прядко Наталія Сергіївна – д.т.н., професор, провідний науковий співробітник ІТМ НАНУ і ДКАУ, м. Дніпро, Україна.

Полішко Роман Мирославович – магістр групи ІТм-25-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Послєд Ігор Сергійович – аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Пушков Валерій Олександрович – магістр групи 122м-24-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Пушков Владислав Сергійович – аспірант групи ЕЕа-25-10 кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Разживін Олексій Валерійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Рекова Наталія Юріївна – д-р екон. наук, професор, перший проректор – проректор з навчальної роботи ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Репич Олексій Владиславович – аспірант групи 174А-24-10 кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Різниченко Лілія Віталіївна – студентка групи 122-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Ровенська Вікторія В'ячеславівна – к.е.н., доцент, декан факультету автоматизації виробництва та цифрових технологій ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Руденко Максим Миколайович – аспірант групи ЕЕа-25-10 кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Рулікова Валерія Віталіївна – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Руксов Євгеній Вікторович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення», група 121А-23-5 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Рухлов Артем Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Савенко Дмитро Олександрович – студент групи ІТм-25-2 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сагайда Павло Іванович – д.т.н., доцент, професор кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Самойленко Діана Дмитрівна – магістр групи 125м-24-1 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Селянський Олександр Олександрович – студент групи ЕІ-24-1 кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Семенов Сергій Юрійович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сергєєва Катерина Леонідівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Середняк Катерина Олександрівна – магістр групи 125м-24-2 кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сіданченко Владислав Вадимович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електроенергетики, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сімкін Олександр Ісакович – к.т.н., професор, професор, кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Сироткина Олена Ігорівна – к.т.н, доцент, School of Computer Science University of Windsor, Windsor, Ontario, Kanada.

Соболенко Марія Олександрівна – старший викладач кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна.

Сокол Владислав Євгенович – к.т.н, доцент, докторант кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Соколова Наталя Олегівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сологуб Даніл Дмитрович – студент групи 122-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Сосенюк Олег Вікторович – магістр групи 126м-24-1 кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

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

Стародубський Ігор Петрович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Степанова Анастасія Павлівна – студентка групи 122-24-4 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Строй Богдан Володимирович – студент групи 121-24-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Суботін Олег Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Теліпко Андрій Юрійович – магістр групи 122м-23-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Терновецький Богдан Олегович – магістр групи 122м-23-2 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Тимофєєв Дмитро Сергійович – старший викладач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Ткаченко Сергій Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Удовик Ірина Михайлівна – к.т.н., декан факультету інформаційних технологій, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Удовіков Юрій Володимирович – головний механік шахти ім. «Героїв Космосу» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», м. Павлоград, Україна.

Уланова Наталья Петрівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри прикладної математики НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Файнштейн Даніїл Володимирович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Електрична інженерія» кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Федорцова Софія Вікторівна – студентка групи 122-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Халаімов Тарас Олександрович – асистент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Харь Алена Тарасовна – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Хілов Віктор Сергійович – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Холодюк Анастасія Дмитрівна – студентка групи 122-24-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Худолій Сергій Сергійович – к.т.н., професор, завідуючий кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Цукур Володимир Геннадійович – аспірант групи 124А-24-10 кафедри системного аналізу і управління НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Чумичов Денис Дмитрович – аспірант групи 126А-22-4 спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Чурсина Марія Кирилівна – студентка групи кафедри безпеки інформації та телекомунікацій НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Чухліб Виталий Леонидович – д.т.н., професор, завідувач кафедри КМІТ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

Шарандо Артем Андрійович – магістр групи 122м-23-1 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Швачич Геннадій Григорович – д.т.н., професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Шевцова Ольга Сергіївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Щербина Павло Олександрович – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Ширін Артем Леонідович – к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Шихаліса Гадір – студент групи 121м-24-3 кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Шихов Станіслав Кирилович – аспірант кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Шишацький Олександр Олександрович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Шрамко Юрій Юрійович – к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна.

Штуць Андрій Анатолійович – к.т.н., доцент, завідуючий кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна.

Яланський Олексій Анатольович – к.т.н., доцент, доцент кафедри електропривода НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

Яшкін Ростислав Ігорович – здобувач вищої освіти освітньо-наукового рівня «Доктор філософії» за освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

ЗМІСТ

Розділ 1. ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ЕНЕРГЕТИКИ…….. 4

1. **Півняк Г.Г., Азюковський О.О., Луценко І.М., Кошеленко Є.В., Запишний О.О.** Принципи реалізації мікромереж для електропостачання споживачів населених пунктів…… 4
2. **Удовіков Ю.В., Папаїка Ю.А., Рухлов А.В., Селянський О.О.** Практичний досвід впровадження цифрових технологій у підземну систему електропостачання вугільної шахти……... 12
3. **Півняк Г.Г., Папаїка Ю.А., Лисенко О.Г., Малишко М.М.** Практичний досвід впровадження цифрових технологій у системі електропостачання АТ «Нікопольський завод феросплавів»…… 16
4. **Азюковський О.О., Шихов С.К.** Методи мінімізації корозійних ризиків викликаних роботою суміжних станцій катодного захисту 21
5. **Файнштейн Д.В., Дяченко Г.Г.** Обґрунтування вимог до цифрових двійників як засобів підвищення ефективності промислових мікрогрід-систем……. 26
6. **Литвинчук О.В., Олішевський Г.С.** Проєкт інтелектуального iot-модуля для моніторингу енергоспоживання на базі ESP32 та HLW8012……..….. 29
7. **Кириченко М.С.** Застосування однодіодної моделі PV-модуля в середовищі Python для оцінки генерації енергії на основі даних PVGIS…….…... 32
8. **Папаїка Ю.А., Пушков В.С.** Архітектура та алгоритми керування інтелектуальними мікромережами з ВДЕ…….….. 35
9. **Зибалов Д.С.** Методи пошуку точки максимальної потужності сонячного фотоелектричного перетворювача……. 38
10. **Сіданченко В.В., Руденко М.М.** Фрактальний аналіз та негауссівська природа електричного навантаження енергосистем (Бельгія, Польща, 2015–2025)……... 44

Розділ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ……..… 47

11. **Shvachych H., Pashchenko V., Dmytriyeva O.** Development of an interactive system for generating procedurally generated 2D maps….. 47
12. **Moroz B.I., Shyshatskyi O.O., Sirotkina O.** Methods, algorithms, and programs for error detection in a geospatial database…… 53
13. **Семенов С.Ю., Лактіонов І.С., Дяченко Г.Г.** Результати розробки вебзастосунку прогнозування врожайності агрокультур із інтеграцією алгоритмів пояснювального штучного інтелекту…….. 56
14. **Shvachych H., Shykhaliiev G.** The development and creation of responsive emotionally oriented mobile application……..… 60

15. **Удовик І.М., Мещеряков Л.І., Харь А.Т., Байдашний Є.С.** Моделі виявлення та відстеження об'єктів у відеопотоці з використанням механізму уваги……..…… 64
16. **Алексєєв М.О., Пушков В.О.** Дослідження фреймворку SWIFTUI для прискорення розробки додатків на платформі IOS……..…. 73
17 . **Руксов Є.В., Мороз Б.І.** Функціональне представлення 3D-об'єктів як складова генеративних методів моделювання аеродинамічних виробів……...……. 77
18. **Спірінцев В.В., Бурлака О.С.** Дослідження впливу архітектурних рішень на продуктивність, підтримуваність та процес розробки програмного забезпечення……..…… 84
19. **Круглик А.С., Мороз Д.М.** Порівняння систем моніторингу GRAFANA, PROMETHEUS, OPENTELEMETRY…….……. 93
20. **Шевцова О.С., Вялушкін С.О.** Дослідження та розробка методів побудови і навчання нейронних мереж для моделювання стратегічної поведінки в логічних іграх…… 97
21. **Спірінцев В.В., Дубіна Є.С.** Дослідження ефективності реалізації мікросервісної системи моніторингу користувачів і ресурсів AWS у сфері електронної комерції засобами C# та GO…..…… 98
22. **Бердник М.Г., Стародубський І.П.** Метод адаптивної контейнеризації з інтеграцією штучного інтелекту……. 103
23. **Іванов Д.В., Гнатушенко В.В.** Автоматизована геоінформаційна технологія оцінювання якості цифрових топографічних планів масштабу 1:2000…….. 109
24. **Мещеряков Л.І., Кожевников А.В., Мацюк С.М., Шарандо А.А.** Реалізація веб-додатку збереження та аналізу криптоданих…….. 115
25. **Holinko O., Kuznetsov O.** Information and technological approach to powering thermocatalytic sensors in automated security systems…… 125
26 **Спірінцев В.В., Волошин Д.А.** Інформаційна система здійснення SEO-аналізу вебресурсів для подальшої їх оптимізації……..…. 130
27. **Шевцова О.С., Щербина П.О., Григорян С.В.** Удосконалення технології адміністрування офісних систем у гібридному робочому середовищі…… 137
28. **Приходченко С.Д., Атаманчук О.А.** Аналіз ефективності нейронних моделей для визначення емоцій користувачів у тексті. 140
29. **Holinko O.V.** Smart contracts in blockchain technology architecture: technical principles, advantages, and areas of development……. 149
30. **Спірінцев В.В., Терновецький Б.О.** Оптимізація процесу постановки та управління завданнями в IT-компанії засобами штучного інтелекту……. 155
31. **Сергєєва К.Л., Чумичов Д.Д., Нікулін С.Л., Кавац О.О., Кавац Ю.В.** Інформаційна технологія нейромережевої класифікації

поверхневих водойм за даними SENTINEL-1 та SENTINEL- 2…… 160
32. **Мещеряков Л.І., Одновол М.М., Уланова Н.П., Грушко Є.О.** Обробка розподілених транзакційв мікросервісній архітектурі… 168
33. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Кочева С.М.** Вплив User-інтерфейсу (UI) мобільних додатків на користувацький досвід (UX) для різних вікових категорій……..….. 178
34. **Битько А.М.** Технології блокчейн і проблеми високопродуктивних обчислень…… 182
35. **Лактіонов І.С., Візнюк А.В.** Метод підвищення достовірності систем підтримки прийняття агротехнічних рішень на основі LLMs та RLVR…….. 186
36. **Швачич Г.Г., Щербина П.О., Іванченко О.В., Алімов В.О.** Проєктування системи адміністрування хмарних офісних сервісів в IT-інфраструктурі підприємства……..……. 188
37. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Харь А.Т., Лисиченко І.Ю.** FIGMA MAKE – використання штучного інтелекту у вебдизайні……. 193
38. **Швачич Г.Г., Щербина П.О., Мартиненко А.А., Горченко М.В.** Дослідження ефективності розподілених обчислень у систем реального часу на основі технології CUDA……..……. 196
39. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Куваєв М.В., Різниченко Л.В.** VUE.JS – сучасний підхід до створення web-інтерфейсів……. 199
40. **Горбова О.В.** Сучасні проблеми людино-машинної взаємодії та методи їх подолання…… 202
41. **Мовлик Д.Д., Соколова Н.О.** Процедурна генерація ігрового світу на рушії UNITY з використанням ШІ та патернів проєктування… 206
42. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Іщук П.О., Степанова А.П.** FIGMA як сучасне середовище для розробки вебмакетів та прототипів… 214
43. **Вдовиченко Р.С., Іванов Д.В.** Вплив розвитку інформаційних технологій на підходи до оптимізації програмного коду……..…. 217
44. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Алексєєв М.О., Строй Б.В.** SMARTY TEMPLATE ENGINE – сучасний підхід до розділення логіки та розмітки в PHP…….. 223
45. **Мороз Б.І., Єрмаков В.В.** Управління організацією обробки повідомлень в OLAP системах……. 226
46. **Бердник М.Г., Яшкін Р.І.** Класифікація хвороби паркінсона на основі акустичних та SSL-ознак спонтанного україномовного мовлення…….…. 231
47. **Мірошниченко С.О., Мірошниченко В.І.** Методологія адаптивного визначення рівня сервісу в системах управління запасами на основі нечіткої логіки…… 234

48. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Хілов В.С., Федорцова С.В.** Адаптивність і кросплатформність як основа сучасних web-проєктів……..….. 237
49. **Іванов Д.В., Куршубадзе Т.Р.** Інтеграційний підхід до поєднання SQL та NoSQL баз даних у гібридних аналітичних системах…… 241
50. **Гаркуша І.М.** Використання CNN для створення масок непрозорих хмар за даними RGB-каналів мультиспектральних космознімків 246
51. **Курандо О.І., Плєснецов Ю.О., Плєснецов С.Ю.** Технологічні вимоги до гнутих профілів…….…... 250
52. **Сагайда П.І., Ільяшенко І.О.** Дослідження моделей та методів інформаційної підтримки формування змісту дисциплін освітньо-професійних програм у технічному університеті…….….. 254
53. **Спірінцев В.В., Приліпко К.Г.** Дослідження потенціалу засобів штучного інтелекту для оптимізації адміністрування освітньо-комунікаційних процесів…….. 257
54. **Добряк С.К., Гурковська С.С**. Розробка віртуального лабораторного стенда з використанням web-технологій……... 262
55. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Клименко А.В., Проценко В.О.** Створення вебдодатку чатмесенджера для зручної роботи з користувачами системи працевлаштування…….……. 265
56. **Сагайда П.І., Мироненко О.В.** Оптимізація інформаційної підтримки управлінської діяльності для забезпечення відповідності стандартам сертифікації з залученням штучного інтелекту……... 269
57. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Сологуб Д.Д.** Використання технологій штучного інтелекту при створенні вебсайтів……... 272
58. **Сагайда П.І., Плуталов Я.А.** Дослідження методів та алгоритмів використання AI-агентів для організації інтелектуального освітнього середовища…….. 275
59. **Добряк С.К.** Проєктування апаратно-програмного комплексу графічного адаптеру з використанням FPGA……..… 278
60. **Колісник К.Д., Чухліб В.Л.** Моделювання процесу згинання гаків великої вантажопідйомності з урахуванням температурних режимів……. 282
61. **Ровенська В.В., Сагайда П.І., Рекова Н.Ю., Касьянюк О.С.** Розробка та використання платформи EDUFLOW BI технічного університету «Метінвест політехніка» в контексті українських практик освітньої аналітики……... 284
62. **Кожевников А.В., Сосенюк О.В.** Концептуальна модель аналізу історії змін програмного забезпечення…….…… 287
63. **Панченко М.В., Сагайда П.І.** ECAPA-TDNN для голосової біометрії: переваги над X-VECTORS та RESNET для інтегрованої верифікації мовця та антиспуфінгу…… 293

64. **Приходченко С.Д., Шевцова О.С., Калінкін Б.П.** Використання трансформерних моделей у задачі машинного перекладу…….. 296
65. **Спірінцев В.В., Ширін А.Л., Рулікова В.В., Холодюк А.Д.** THREE.JS у сучасній веброзробці…….. 303
66. **Теліпко А.Ю., Кабак Л.В.** Реалізація інтерактивних середовищ як навчального інструменту за допомогою рушія UNREAL ENGINE 5 та мови програмування C++……. 307
67. **Кабак Л.В., Карабеза В.В.** Дослідження ефективності системи оптимізації завантаження серверів у мікросервісній архітектурі засобами C# та JAVA…….. 310
Розділ 3. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА НАУКИ ПРО ДАНІ…… 315
68. **Желдак Т.А., Кривокоритов А.В.** Інформаційні методи підтримки прийняття бізнес-рішень на ринку енергоносіїв……..… 315
69. **Молоканова В.М., Цукур В.Г.** Зміни вимог до компетенцій менеджерів IT-проєктів у зв'язку із застосуванням штучного інтелекту…….. 321
70. **Алексєєв О.М., Абрамов А.С.** Розробка конвертора графів знань для підвищення ефективності машинного навчання…….. 326
71. **Danylo Lubenets** Post-optimization analysis and streamlining of material flows in hierarchical transport systems……..… 330
72. **Іванов Д.В., Полішко Р.М.** Інтелектуальна методологія парсингу веб-даних для автоматизованого збору інформації……. 334
73. **Соболенко М.О.** Комп'ютерне моделювання швидкісних режимів термічної обробки сталі…….…… 340
74. **М'якенький А.В.** Метод розв'язання задачі генерації семантичних репрезентацій текстів у мовах з невеликою кількістю ресурсів….. 343
75. **Чумичов Д.Д., Нікулін С.Л.** Нейромережева класифікація супутникових знімків для виявлення неорних земельних ділянок. 349
76. **Бабець Д.В. , Гулівець М.О.** Огляд сучасних підходів до моделювання часових рядів на основі гібридного підходу: інструменти рекурентного та фрактального аналізу у поєднанні з методами машинного навчання……..… 356
77. **Абраменков К.М.** Вдосконалення методів детекції об'єктів на зображеннях з дронів: мультимодальна та темпоральна обробка. 366
Розділ 4. КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ…… 372
78. **Корнієнко В.І., Довбиш О.А.** Обґрунтування методів виявлення та запобігання шахрайству в онлайн-іграх……..….. 372
79. **Самойленко Д.Д., Тимофєєв Д.С.** Автоматизація тестування на проникнення з використанням інструментів генеративного штучного інтелекту…….. 375
80. **Кручінін О.В., Куць М.О.** Оцінка цифрової ідентичності як вразливості ІКС……..…… 382

81. **Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В.** Адаптивна фільтрація ICMP-трафіку для запобігання DDOS-атакам у супутникових каналах передачі даних…… 386
82. **Корнієнко В.І., Пащенко І.А.** Розробка алгоритму передачі даних в АСУ ТП нафтогазового родовища……..……. 391
83. **Кручінін О.В., Зубков М.Ю.** Реалізація вимог стандартів безпеки при розробці програмного забезпечення…… 395
84. **Удовик І.М., Гнатушенко В.В., Лактіонов І.С.** Аналіз енергетичної ефективності та продуктивності FULL-DUPLEX DUAL-BAND систем для застосування в польових репітерних мережах…….…. 401
85. **Іванов Д.В., Гуліч І.П.** Постквантова криптографія у блокчейн-системах: виклики безпеки та напрями розвитку……. 409
86. **Кручінін О.В., Середняк К.О.** Оцінка рівня безпеки для протоколів систем……. 414
87. **Корнієнко В.І., Послєд І.С.** Обгрунтування структури інтелектуальної системи захисту кіберфізічних систем від витоку акустичної інформації…….……. 419
88. **Корченко А.О., Удовик І.М., Олевський В.І**. Моделювання та оптимізація фізичного рівня систем з 4FSK модуляцією під пропрієтарні алгоритми шифрування…….. 425
89. **Корольов Р.В., Сокол В.Є.** Безпечні репітерні архітектури для цифрових радіомереж: комбінований протокол маршрутизації та шифрування…….……... 434
90. **Кручінін О.В., Чурсина М.К.** Аналітичний огляд підходів до виявлення DNS-тунелювання в сучасних системах кіберзахисту. 442
91. **Молодець Б.В., Савенко Д.О.** Інформаційна система збору та обробки даних з наземних станцій для оповіщення про екологічну небезпеку…….. 447

Розділ 5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ..…… 453

92. **Перченко А.В., Новицький І.В.** Моделювання процесу транспортування матеріалу дробимого у ДПК……... 453
93. **Бубліков А.В., Гурбанов Р.А.** Створення системи підтримки прийняття рішень при використанні електроприладів в будівлі... 455
94. **Прядко Н.С., Зубенко С.Є.** Підхід щодо створення системи автоматичного керування переробкою органічних відходів на основі вермикультивування…….. 459
95. **Карапиш О.В., Карпенко О.В.** Автоматизація процесу моніторингу та прогнозування енергоспоживання у розумному будинку у режимі активного споживача…….……..……. 462

96. **Прядко Н.С., Карпов О.В.** Підхід щодо створення системи автоматизації процесу виготовлення заряду з високоенергетичних матеріалів……. 466
97. **Карпенко О.В., Козачук К.В.** Автоматизація процесу керування опаленням багатофункціональним приміщенням на основі класифікації кліматичних умов……..…… 470
98. **Бубліков А.В., Продан Б.Ш.** Створення системи автоматизації процесу керування скребковим конвеєром у вибої при підземному видобутку вугілля……..…….. 473
99. **Прядко Н.С., Репич О.В.** Підхід щодо створення системи автоматичного керування групою водяних акумуляторів в багатоповерхових будинках……. 477
100. **Карпенко О.В., Герасименко І.Ю.** Автоматизація процесу керування вирощуванням різних культур в багатоярусній гідропонній установці……... 480
101. **Донченко Є.І., Масик В.В., Разживін О.В.** Розробка апаратної частини модуля контролю мікроклімату теплиці…….. 484
102. **Сімкін О.І., Ісаєв А.Б., Опанащук М.В.** Способи підвищення ефективності роботи підсистеми управління АСУТП нагріву металу в прохідній печі……..... 491
103. **Антіпов М.М., Суботін О.В.** Підходи до модернізації системи керування баштової градирні…….. 493
104. **Койфман О.О.** Оптимізація режимної карти блоку повітронагрівачів з використанням архівної бази даних АСУТП. 496
105. **Ісаєв А.Б., Сімкін О.І., Васенко Р.О.** Використання трифазного вхідного впливу для покращення динамічної точності процесу регулювання за завданням……..…….. 500
Розділ 6 МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТОТЕХНІКА.……..…….….. 504
106. **Книш В.О., Бешта О.С.** Результати розробки статичної моделі універсального робота-маніпулятора із 5 ступенями свободи….. 504
107. **Худолій С.С., Яланський О.А.** Особливості використання програмно-апаратних засобів стандарту IEC 61131 для циклового керування механізмами для різних траєкторій руху виконавчого пристрою на прикладі маніпулятора пневморобота…….. 509
108. **Шрамко Ю.Ю., Іванчишина С.В.** Інтелектуальні системи контроль технічного стану електроприводів промислових об’єктів на базі цифрових двійників…….. 517
109. **Ткаченко С.М., Бешта Л.В., Біліба Б.С.** Метод позиціонування маніпулятора з трьома ступенями свободи для кіберфізичних навчальних стендів…… 531
110. **Штуць А.А.** Дослідження інтелектуального керування електричними машинами в мехатроніці та робототехніці……. 535

Розділ 7 ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНІСТЬ…….. 540
111 **Beshta O.S., Beshta O.O., Khalaimov T.O.** Remote Control System for a laboratory test bench for real-time assessment of battery-electric vehicle energy consumption…….… 540
112 **A.A. Kolb** Analysis of the state and development prospects of the electric vehicle charging station network in ukraine under martial law conditions……..……... 545
113 **Beshta O.O., Plahunov O.M.** The principle of operation of an electric vehicle platform based on omnidirectional mecanum wheels…… 548
114 **Бородай В.А., Боровик Р.О.** Симулятор FluidSIM як засіб формування професійних компетенцій з мехатронних систем… 552
115 **Bieliaiev O.S.** Prevention of friction-induced self-oscillations and ensuring the specified quality indicators of a two-mass electromechanical system with a quasi-neuroregulator…….. 556
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ……. 563

Наукове видання

XX Міждународна конференція

ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ОСВІТІ, НАУЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

Збірник наукових праць
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
№ 10

Відповідальний за випуск та коректура
д.т.н., професор Леонід Іванович Мещеряков

Видано в редакції авторів публікацій.

Підп. до друку 01.12.2025. Формат $60\times84^{1}/_{8}$.
Папір офсетний. Друк цифровий.
Обл.-вид. арк. 73,3. Ум. друк. арк. 68,9.
Наклад 100 пр. Зам № 43

Підготовлено до друку НТУ «Дніпровська політехніка»,
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №1842 від 11.06.2004 р.

Видавництво «Журфонд»
49001, Дніпро, вул. Старокозацька, 8.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №684 від 21.11.2001 р.

Віддруковано ПП Вахмістров О.Є.
49001, Дніпро, вул. Писаржевського, 18.