МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО

НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

Головний редактор – професор, д.т.н., Гриценко О.О.

№59 2025

м. Одеса

Адреса редколегії:
Луцький національний технічний університет
кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки
вул. Львівська 75, ауд.141
м.Луцьк, 43018
тел. (0332) 74-61-15
E-mail: cit@lntu.edu.ua,
сайт журналу: **cit.lntu.edu.ua**

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО

№59 2025 р.

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення, як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення №40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02456)
Рекомендовано до друку Науково-технічною радою Луцького національного технічного університету
(протокол №13 засідання від 21.06.2025р.)
Рішенням МОН України
наказом №515 від 16.05.2016р,
журнал включено в перелік наукових фахових видань

Видання індексується у наукометричних та реферативних базах:
Open Academic Journals Index
Academic Resource Index ResearchBib
Rootindexing
Information Matrix for the Analysis of Journals
Ulrichsweb

ISSN 2524-0560 (Online)
ISSN 2524-0552 (Print)

ЗМІСТ

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-01
УДК 004.93, 004.031.4, 004.622, 004.514
Ковівчак Ярослав Васильович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-3562-4924
Дубук Василь Іванович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-6339-1032
Баранов Кирило Олегович, студент магістратури
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ ЗА ЗОБРАЖЕННЯМ ОБЛИЧЧЯ

Ковівчак Я. В., Дубук В. І., Баранов К. О. Розробка автоматизованої системи розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя. У статті розглянуто проектування і розробку автоматизованої системи визначення емоційного стану людини за зображенням обличчя. Приведено обґрунтування актуальності розробки системи. Здійснено аналіз існуючих аналогічних систем, призначених для визначення емоційного стану людини, а також приведено їх переваги і недоліки. Розроблено структурну схему автоматизованої системи визначення емоційного стану людини за зображенням обличчя. Побудовано діаграми варіантів використання для користувачів системи. Приведено блок-схеми алгоритмів роботи системи. Розроблено функціональну модель системи та діаграми різних рівнів її декомпозиції. Розроблено діаграму компонентів системи. Здійснено реалізацію всіх компонентів системи та інтерфейсу користувача. Проведено тести. Розроблена автоматизована система визначення емоційного стану людини за зображенням обличчя може знайти успішне застосування для автоматизації процесу розпізнавання та аналізу емоційного стану людини у різних предметних областях людської діяльності.

Ключові слова: автоматизована система, розпізнавання обличчя, емоційний стан, аналіз емоційного стану, автоматизація процесів.

Kovivchak Ya., Dubuk V., Baranov K. Development of an automated system for determining a person's emotional state based on facial images. The article considers the design and development of an automated system for determining a person's emotional state from a facial image. The justification for the relevance of developing system is provided. An analysis of existing similar systems designed to determine a person's emotional state is carried out, and their advantages and disadvantages are also given. A structural diagram of an automated system for determining a person's emotional state from a facial image is developed. Use case diagrams for system users are constructed. Block diagrams of the system's operation algorithms are provided. A functional model of the system and diagrams of different levels of its decomposition are developed. A diagram of the system components is developed. All components of the system and the user interface are implemented. Tests are executed. The developed automated system for determining a person's emotional state from a facial image can be successfully used to automate the process of recognizing and analyzing the emotional state of people in various subject areas of human activity.

Keywords: automated system, face recognition, emotional state, emotional state analysis, process automation.

Постановка задачі. Емоційний стан відіграє важливу роль у житті людини. Він залежить від внутрішніх переживань та зовнішніх обставин, в яких знаходиться людина. Наявність тих чи інших емоцій відображає сприйняття та відношення людини до ситуації, подій та обставин, у які вона потрапляє. Різні емоційні стани впливають на зосередженість, поведінку, психічний та загальний фізіологічний стан людини. Це проявляється у зміні виразу обличчя, зовнішньої поведінки, ходьби, жестикуляції, швидкості реакції на різні подразники. Існують емоційні стани, які можуть викликати небезпечні ситуації при виконанні людиною професійних завдань та суттєво знижують ефективність їх виконання. Особливо це стосується виконання таких видів робіт, які пов'язані з управлінням різними об'єктами: водіїв транспортних засобів, операторів виробничих і сервісних систем, диспетчерів служб швидкої допомоги та спеціальних служб.

Розпізнати емоційний стан людини можна за різними ознаками її поведінки. З фізіологічної точки зору, зміна емоційного стану людини завжди проявляється на її обличчі, що відображається відповідним образом обличчя і це варто врахувати. Отже, за образом обличчя можна визначити зміни в емоційному стані людини, і це є об'єктивною, достовірною та надійною інформацією про її психічний стан та можливу наступну поведінку людини.

На сьогодні, для визначення емоційного стану людини застосовують автоматизовані системи опрацювання зображень, а саме - системи розпізнавання образів. Такі системи широко використовуються в різних сферах людської діяльності: при автоматизації надання

різноманітних послуг (з метою визначення рівня задоволення клієнтів), у системах безпеки (для завчасного виявлення потенційних порушників), у медицині (для визначення психічних та фізіологічних станів і розладів, рівня відчуттів, болю) і т.д. Крім того, у багатьох країнах світу спеціальні служби періодично проводять спостереження за емоційним станом населення. Це дає змогу оцінити рівень задоволення громадян життям, відношення громадян до результатів, напрямків та способів проведених змін у країні. Такі спеціальні системи набувають все більшого значення для формування, функціонування та розвитку сучасного суспільства. З розвитком нових інформаційних технологій актуалізуються завдання розробки нових та удосконалення існуючих автоматизованих систем, що працюють в області спостереження, аналізу та корекції емоційного стану людини.

Тому розробка автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням образу її обличчя є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було проведено аналіз існуючих систем, які використовуються для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя.

Серед інформаційних систем-аналогів, що серед різних інших корисних функцій виконують функції розпізнавання емоційного стану особи за зображенням обличчя потрібно назвати Luxand [1], SkyBiometry [2], Face++ [3], Kairos [4], Amazon Rekognition [5], Azure Face API [6], MorphCast [7], FindFace [8], Google Cloud Vision AI [9], Tobii Pro Sticky [10], Eyesee [11], Inventiv AI [12].

До найбільш розповсюджених серед систем-аналогів можна віднести вебсистеми Test your RBF та систему MyMoodScan.

Розглянемо вебсистему Test your RBF [13]. Вона є одним із інструментів програмного забезпечення Face Reader від Noldus Information Technology BV. Сервіс тестування RBF від системи [14] дає змогу визначити наявність емоцій за зображенням обличчя, а також передбачає можливість визначення позиції голови, статі та віку особи, наявність чи відсутність бороди, окулярів. Інтерфейс користувача системи Test your RBF [14] приведено на рис. 1.

Рис. 1 – Інтерфейс користувача системи Test your RBF

Сервіси системи Test your RBF дають змогу визначити наступні емоційні стани людини: спокій, щастя, сум, злість, страх, здивування, відразу та зневагу. Також, сервіс чітко ідентифікує ключові ознаки елементів обличчя - очей і губ. Найменш ефективним цей сервіс є при визначенні відрази за зображенням обличчя людини.

Вікно з прикладом роботи системи [14] приведено на рис. 2.

Рис. 2 – Вікно з прикладом роботи системи Test your RBF з сумним виразом обличчя дитини

До переваг системи Test your RBF можна віднести: простий та інтуїтивний інтерфейс; наявність підказок; відсутність оплати при використанні; широкий спектр визначення емоцій; відтворення на зображенні передбачень моделі. Недоліки: низька точність розпізнавання обличчя та його основних ознак при нетиповому положенні голови; низька точність передбачення окремих емоцій: злості, смутку, страху і відрази.

Система MyMoodScan, розроблена компанією MorphCast [7], також призначена для визначення емоційного стану людини за зображенням обличчя. Дана система є безкоштовною. Вона передбачає автоматичне розпізнавання наступних емоцій людини: наявність злості, відрази, суму; щастя; здивування; страху та відсутності емоцій. Інтерфейс користувача системи MyMoodScan [15] приведений на рис. 3.

Рис. 3 – Інтерфейс користувача системи MyMoodScan

Інтерфейс системи MyMoodScan є простим. Після завантаження зображення обличчя людини процес розпізнавання емоцій займає за часом до 5 секунд.

Рис. 4 – Приклад роботи інтерфейсу системи MyMoodScan з нейтральним виразом обличчя

Крім визначення емоції, система MyMoodScan виводить візуальну інформацію про виявлені емоції особи на координатній площині. На цій площині емоційний стан особи відображається емоційним спектром у вигляді палітри кольорів. Рівень кожної емоції позначається відповідним кольором. Також система дає оцінку обличчя людини за валентністю, збудженням і рівнем уваги. Валентність визначає відношення до негативних чи позитивних емоцій. Також визначається рівень психологічного та фізіологічного збудження людини стосовно виявленої емоції. Крім того система формує короткий текстовий опис про зображення обличчя.

До переваг даної системи можна віднести: висока швидкість опрацювання зображень; простий інтерфейс; візуалізація результатів у вигляді гістограм; наявність додаткових характеристик "емоційної палітри"; наявність текстового опису зображення; можливість опрацювання зображення обличчя у нестандартному положенні. Недоліки: неможливо здійснювати аналіз декількох зображень одночасно; існують приклади, коли система розпізнає лише 50 – 60 відсотків площі зображення обличчя; низька точність розпізнавання емоцій при слабовиражених ознаках на зображенні обличчя; відсутність подання виявлених емоцій у числовому еквіваленті.

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя.

Основна частина. На початкових етапах проектування, розроблено структурну схему автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя. Концептуальна схема системи показана на рис. 5.

Рис. 5 – Концептуальна схема автоматизованої системи розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя

Приведена концептуальна схема відображає основні компоненти системи та зв'язки між ними. Також в результаті виконання роботи з використанням рекомендацій, наведених у [16], було розроблено діаграму випадків використання для користувача системи, яку зображено на рис. 6.

Рис. 6 – Діаграма випадків використання для користувача системи

Розроблено алгоритми роботи автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя. Як приклад, на рис. 7 приведено загальну блок-схему роботи системи, а на рис. 8 показано блок-схему процесу розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя.

Рис. 7 – Блок-схема узагальненого алгоритму роботи системи

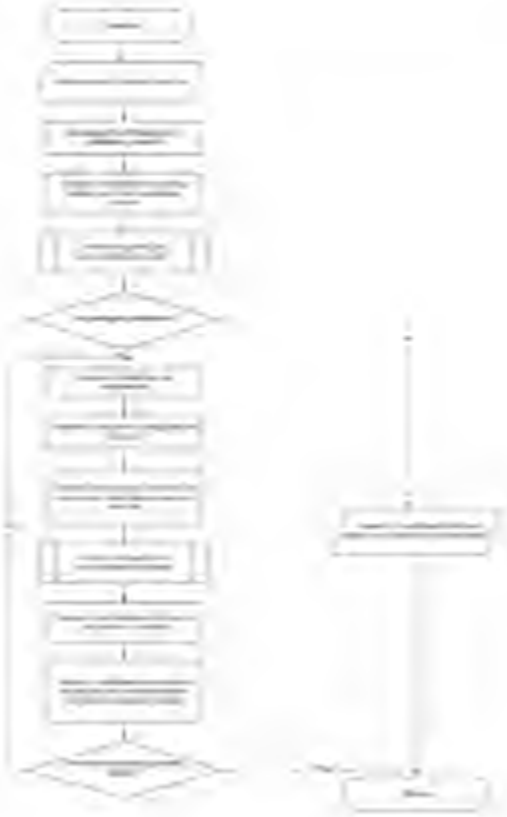


Рис. 8 – Блок-схема процесу розпізнавання емоційного стану особи

Під час проектування системи, також розроблено її модельні діаграми з необхідними рівнями декомпозиції системи. Контекстна діаграма системи приведена на рис. 9.

Рис. 9 – Контекстна діаграма системи

За допомогою контекстної діаграми розкрито взаємозв'язок системи із зовнішнім середовищем. Як видно з діаграми, на вхід системи подається зображення. Система

опрацьовує зображення з використанням наступних механізмів: клієнта, сервера та програмного забезпечення. Зображення опрацьовується у відповідності до специфікації клієнт-серверної архітектури, правил створення HTTP-запитів та WEB API. У результаті, на виході системи виводиться розпізнане обличчя та емоційний стан особи. Декомпозицію першого рівня контекстної діаграми приведено на рис. 10.

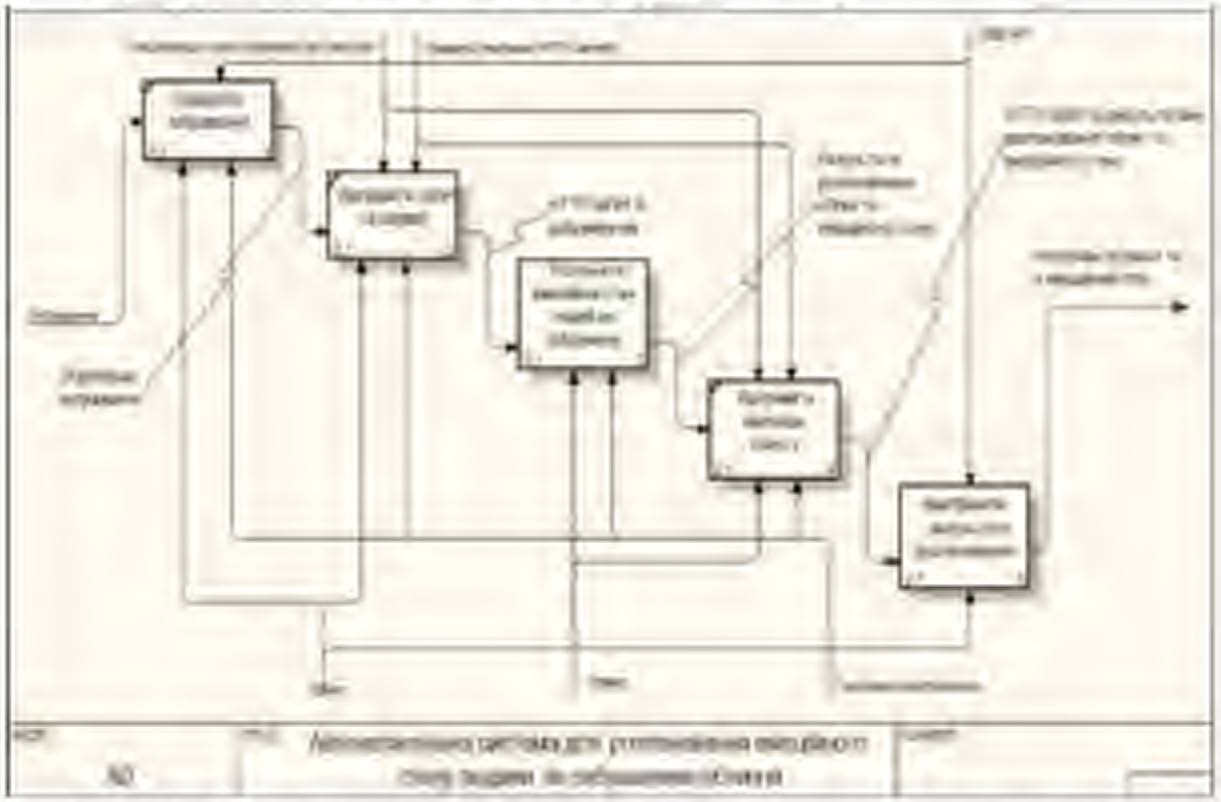


Рис. 10 – Діаграма декомпозиції першого рівня контекстної діаграми функціональної моделі системи

Розроблено діаграму компонентів системи. Система складається з наступних компонентів: інтерфейсу користувача, клієнтської та серверної частини. За допомогою інтерфейсу, користувач вибирає вхідне зображення та переглядає результати опрацювання вибраного зображення. Компонент клієнтської частини здійснює опрацювання вибраного файлу зображення, формує запит, опрацьовує відповідь, оновлює інтерфейс та здійснює рендерінг інтерфейсу.

При розробці діаграми компонентів було враховано рекомендації, наведені у [17]. При побудові діаграм було використано інструментальний засіб RAMUS [18].

Діаграму компонентів автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя приведено на рис. 11.

Рис. 11 – Діаграма компонентів автоматизованої системи

Серверна частина опрацьовує запит, розпізнає обличчя особи, розпізнає емоційний стан за зображенням обличчя, формує результат опрацювання зображення.

Крім того, розроблено інтерфейс користувача автоматизованої системи для розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя. Вибрані вікна інтерфейсу приведено на рис. 12.

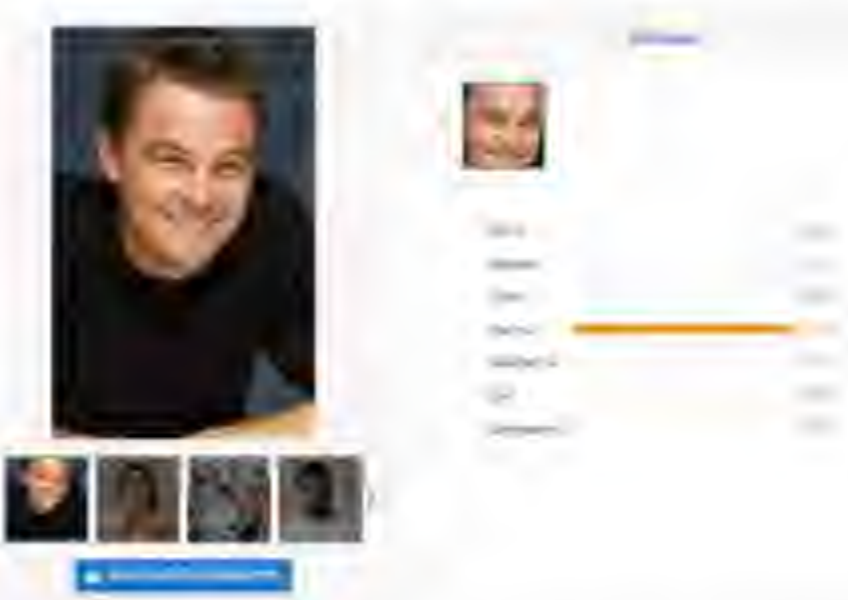


Рис. 12 – Вікна інтерфейсу користувача автоматизованої системи розпізнавання емоційного стану людини за зображенням обличчя

Компоненти автоматизованої системи були розроблені з використанням механізмів інформаційно-технологічних засобів: мови HTML [19], мови JavaScript [20], бібліотеки React [21], інформаційної технології JavaServer Pages [22] та інструментального середовища IntelliJ IDEA [23].

У результаті виконання роботи було здійснено реалізацію та тестування всіх компонентів автоматизованої системи розпізнавання емоційного стану особи за зображенням обличчя.

Висновки. Розроблено автоматизовану систему розпізнавання емоційного стану особи за зображенням обличчя. Розроблена система може знайти успішне застосування для автоматизації процесу розпізнавання та аналізу емоційного стану осіб у різних предметних областях людської діяльності, а саме - як окрема підсистема у складі системи безпеки транспортних підприємств, у бізнесі, в медицині та в освіті.

Список бібліографічного опису

1. FaceSDK Enterprise Grade Solution For Face Recognition. Luxand. Luxand Inc. 2025. URL: https://www.luxand.com/ (date of access: 09.04.2025).
2. Face Detection API. SkyBiometry. UAB „SkyBiometry". 2025. URL: https://skybiometry.com/ (date of access: 09.04.2025).
3. FaceID Identity Verification Solution. Face++. Megvii Beijing Kuangshi Technology Co. Ltd. 2025. URL: https://www.faceplusplus.com/ (date of access: 09.04.2025).
4. Instant Identity Verification. Kairos. Kairos AR Inc. 2025. URL: https://www.kairos.com/features/identity-verification (date of access: 09.04.2025).
5. Amazon Rekognition. AWS. Amazon Web Services Inc. 2025. URL: https://aws.amazon.com/rekognition/?nc1=h_ls (date of access: 09.04.2025).
6. Face API reference list. Learn. Azure. Microsoft. 2025. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/ai-services/computer-vision/identity-api-reference (date of access: 09.04.2025).
7. World's Most Energy-Efficient server-free Facial Emotion AI. MorphCast. Morpheast Inc. 2025. URL: https://www.morpheast.com/ (date of access: 09.04.2025).
8. Burgett G. FindFace is a new facial recognition app that could end public privacy. DigitalTrends. Digital Trends Media Group. 2025. URL: https://www.digitaltrends.com/photography/findface-neural-networks-detect-people-public-with-70-reliability/ (date of access: 09.04.2025).
9. Vision AI. Extract insights from images, documents, and videos. Cloud Vision API. Google Cloud. Google. 2025. URL: https://cloud.google.com/vision (date of access: 10.04.2025).
10. Sticky by Tobii: Online eye tracking made easy. Tobii. 2025. URL: https://www.tobii.com/products/software/consumer-research-software/sticky (date of access: 10.04.2025).
11. Understand behavior, grow further. Eyesee. 2025. URL: https://www.eyesee-research.com/ (date of access: 10.04.2025).
12. Unlock Human Psyche with AI. Imentiv ai. Imentiv. 2025. URL: https://imentiv.ai/ (date of access: 10.04.2025).
13. Get the best facial expression data. FaceReader. Noldus. Noldus Information Technology BV. 2025. URL: https://noldus.com/facereader (date of access: 11.04.2025).
14. Test if you have Resting Bitch Face. Test Your RBF. Noldus Information Technology BV. 2025. URL: https://www.testrbf.com/index.html (date of access: 11.04.2025).
15. MyMoodScan. MorphCast. Morpheast Inc. 2025. URL: https://mymoodscan.ai/ (date of access: 11.04.2025).
16. Тохтиєвський О. М., Печеник Г. Г., Вітер М. Ь. Дубук В. І. Інформаційні технології та моделювання бізнес-процесів. Навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2023. 296 с. URL: https://cul.com.ua/informacijni-tehnologiyi-ta-modelyuvannya-biznes-procesiv (дата звернення: 12.04.2025 р.).
17. The Easy Guide to Component Diagrams. Creately. Cinergix Pty Ltd (Australia). 2025. URL: https://creately.com/blog/software teams/component diagram tutorial/ (date of access: 02.05.2025).
18. RAMUS Java-based IDEF0 & DFD Modeler. Ramus. URL: https://ramussoftware.com/ (date of access: 02.05.2025).
19. HTML: HyperText Markup Language. MDN Web Docs. Mozilla. The Mozilla Foundation. Mozilla Corp. 2025. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML (date of access: 02.05.2025).
20. JavaScript. MDN Web Docs. Mozilla. The Mozilla Foundation. Mozilla Corp. 2025. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript (date of access: 02.05.2025).
21. React. The library for web and native user interfaces. Meta Open Source. Meta Platforms Inc. 2025. URL: https://react.dev/ (date of access: 02.05.2025).
22. JavaServer Pages Technology. Oracle. 2025. URL: https://www.oracle.com/java/technologies/jspt.html (date of access: 02.05.2025).
23. IntelliJ IDEA. The IDE for Professional Development in Java and Kotlin. JETBRAINS. JetBrains S.r.o. 2025. URL: https://www.jetbrains.com/idea/ (date of access: 02.05.2025).

References

1. Luxand Inc. Luxand. (2025). FaceSDK Enterprise Grade Solution For Face Recognition. https://www.luxand.com/
2. UAB „SkyBiometry". SkyBiometry. (2025). Face Detection API. https://skybiometry.com/
3. Beijing Kuangshi Technology Co. Ltd. Megvii. (2025). FaceID Identity Verification Solution. Face++. https://www.faceplusplus.com/
4. Kairos AR Inc. Kairos. (2025). Instant Identity Verification. https://www.kairos.com/features/identity-verification.
5. Amazon Web Services Inc. AWS. (2025). Amazon Rekognition. https://aws.amazon.com/rekognition/?nc1=h_ls
6. Microsoft. Azure. (2025). Face API reference list. Learn. https://learn.microsoft.com/en-us/azure/ai-services/computer-vision/identity-api-reference
7. Morpheast Inc. MorphCast. (2025). World's Most Energy-Efficient server-free Facial Emotion AI. https://www.morpheast.com/

8. Burgett, G. Digitaltrends. Digital Trends Media Group. (2025). FindFace is a new facial recognition app that could end public privacy. https://www.digitaltrends.com/photography/findface-social-networks-detect-people-public-with-70-reliability/
9. Google. Google Cloud. (2025). Vision AI: Extract insights from images, documents, and videos. Cloud Vision API. https://cloud.google.com/vision
10. Tobii. (2025). Sticky by Tobii. Online eye tracking made easy. https://www.tobii.com/products/software/consumer-research-software/sticky
11. Eyesee. (2025). Understand behavior, grow further. https://www.eyesee-research.com/
12. Imentiv. Imentiv ai. (2025). Unlock Human Psyche with AI. https://imentiv.ai/
13. Noldus Information Technology BV. Noldus. (2025). Get the best facial expression data. FaceReader. https://noldus.com/facereader
14. Noldus Information Technology BV. Noldus. (2025). Test if you have Resting Bitch Face. Test Your RBF. https://www.testrbf.com/index.html
15. Morphcast Inc. MorphCast. (2025). MyMoodScan. https://mymoodscan.ai/
16. Tomashevskyi, O.M., Isegelyk, O.G., Viter, M.B., & Dubuk, V.I. (2023). Informatsiyni tekhnologiyi ta modelyuvannya biznes-protsesiv. Navch. posib. [Information technologies and business processes modelling. Tutorial. Book]. Kyiv: Centr uchbovoyi literatury. https://cul.com.ua/informacijni-tehnologiyi-ta-modelyuvannya-biznes-procesiv [in Ukrainian]
17. Creately Pty Ltd (Australia). Creately. (2025). The Easy Guide to Component Diagrams. https://creately.com/blog/software-teams/component-diagram-tutorial/
18. Ramus. (2025). RAMUS Java based IDEF0 & DFD Modeler. https://ramussoftware.com/
19. Mozilla Corp. The Mozilla Foundation. (2025). HTML: HyperText Markup Language. MDN Web Docs. Mozilla. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML.
20. Mozilla Corp. The Mozilla Foundation. (2025). JavaScript. MDN Web Docs. Mozilla. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript
21. Meta Platforms Inc. Meta Open Source. (2025). React. The library for web and native user interfaces. https://react.dev/
22. Oracle. (2025). JavaServer Pages Technology. https://www.oracle.com/java/technologies/jspt.html
23. JetBrains S.r.o. (2025). IntelliJ IDEA. The IDE for Professional Development in Java and Kotlin. JETBRAINS. https://www.jetbrains.com/idea/

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-02
УДК 519.7-004.056
Личик Владислав Васильович, асистент
https://orcid.org/0009-0006-3314-6550
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

АДАПТИВНИЙ ПІДХІД ДО РЕАГУВАННЯ НА ПОРУШЕННЯ КІБЕРСТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Личик В. В. Адаптивний підхід до реагування на порушення кіберстійкості об'єктів критичної інфраструктури. Кібератаки на об'єкти критичної інфраструктури в ході сучасної повномасштабної війни стали невід'ємним аспектом тиску на системи розподілення та одним з ключових частин безпосередніх військових дій. Зокрема, останні актуальні атаки у кіберпросторі спрямовані не тільки нанести шкоду окремим локальним підсистемам, а й направлені на дестабілізацію внутрішніх процесів в країні через атаки на енергетичні компанії та підрозділи, водопостачальні мережі, фінансові установи та інші життєво важливі об'єкти. Саме тому, все ще актуальною залишається проблематика кількісної оцінки кіберстійкості, тобто здатності системи/підприємства витримати певний негативний вплив та у майбутньому відновитися до прийнятного функціонального стану. Разом з тим, важливо також розуміти чітку структуру та ієрархію критичності таких кіберінцидентів, оскільки як показали останні події – вони можуть мати абсолютно різний характер, в залежності від сфери чи сектору держави. Таким чином, в ході дослідження було проведено аналіз найбільших існуючих фреймворків та систем для оцінки кіберстійкості, саме з точки зору кількісної, а не якісної оцінки. У статті йдеться про недостатність традиційних якісних методів оцінювання та обґрунтовується потреба у впровадженні кількісних метрик, що дозволяють оцінювати рівень кіберстійкості, моделювати та оцінювати потенційні втрати. У статті проаналізовано сучасні підходи до кількісної оцінки кіберстійкості, їхню застосовність в умовах українського енергетичного сектору та запропоновано розподіл кіберінцидентів за критичністю, порядок реагування та потенційні напрямки ураження.
Ключові слова: кіберстійкість; відновлення; функціональний стан об'єкта; кількісна оцінка рівня кіберстійкості; критичність кіберінциденту.

Lychyk V. Adaptive Approach to Responding to Cyber Resilience Breaches of Critical Infrastructure Facilities. Cyberattacks on critical infrastructure during modern full-scale war have become an integral aspect of pressure on distribution systems and one of the key components of direct military action. In particular, recent attacks in cyberspace are aimed not only at damaging individual local subsystems, but also at destabilising internal processes in the country by affecting energy companies and divisions, water supply networks, financial institutions and other vital facilities. That is why the issue of quantitative assessment of cyber resilience, specifically the ability of a system/enterprise to withstand a certain negative impact and recover to an acceptable functional state in the future, remains relevant. At the same time, it is also important to understand the precise structure and hierarchy of the criticality of such cyber incidents, since, as recent events have shown, they can be of a completely different nature, depending on the field or sector of the state. Thus, the paper analysed the largest existing frameworks and systems for assessing cyber resilience, specifically from the point of view of quantitative rather than qualitative assessment. The paper described the inadequacy of traditional qualitative assessment methods and justified the need to introduce quantitative metrics that allow assessing the level of cyber resilience, modelling and evaluating potential losses. The paper analysed modern approaches to quantitative assessment of cyber resilience, their applicability in the Ukrainian energy sector and proposed a classification of cyber incidents by criticality, response procedure and potential areas of damage.
Keywords: cyber resilience; recovery; functional state of an object; quantitative assessment of cyber resilience; criticality of a cyber incident.

Постановка наукової проблеми. Сучасні умови гібридної війни продемонстрували, що кібератаки на критичну інфраструктуру у різних сферах життєдіяльності можуть мати не менш руйнівний характер, ніж фізичні військові дії. З огляду на зростання кількості та складності кібератак, особливо в умовах воєнного стану та гібридної агресії, питання забезпечення безперервного функціонування енергетичних систем набуває пріоритетного значення. Зокрема, гостро постає питання щодо існуючих підходів для забезпечення кіберстійкості [1], або ж навіть відсутності чіткого алгоритму реагування для подальшого відновлення. Таким чином, з'явилась необхідність зміщення фокусу прямої інтеграції безпекових заходів щодо кібератак у сфері критичної інфраструктури на акцент на відновлення системи/об'єкта до прийнятного робочого стану, тобто забезпечення кіберстійкості. Про актуальність цієї тенденції та проблематики також говорить тенденції до створення нових державних органів, на найвищому рівні.

Йдеться про національну систему реагування на інциденти та атаки у кібернетичному просторі [2]. Такий підхід дозволяє організаціям та державним інституціям оцінити потенційні загрози, визначити слабкі місця системи та скоригувати подальші локальні та глобальні стратегії захисту/протидії [3]. Даний аспект необхідний для досягнення оптимального/прийнятного рівня

захисту. Це в свою чергу дає змогу забезпечувати безперервність роботи об'єктів критичної інфраструктури, незважаючи на інтенсивну хорошу діяльність у секторі кібератак. Врахування кількісних оцінок кіберстійкості дозволяє інтегрувати кіберчинет як такий у загальну стратегію національної безпеки. Зокрема, визначати потенціал можливого відновлення після завданої шкоди та розподіл необхідних ресурсів та необхідних сервісів, чи органів управління.

Проте, водночас, якщо з аналізом якісних показників кіберстійкості наявних систем та фреймворків, а також з моделюванням прототипів систем цих об'єктів, ситуація загалом зрозуміла. То в контексті саме кількісного підходу та визначення конкретних метрик/параметрів думки експертів розходяться [4]. Наразі, все ще не існує більш-менш чіткого єдиного механізму, який можна було б застосувати до об'єктів критичної інфраструктури з різних сфер. Спочатку треба розібратися з життєвим циклом забезпечення кіберстійкості. Він може бути узагальнений в наступному порядку:

- планування та підготовка;
- виявлення та аналіз;
- сповіщення та стримування;
- ліквідація наслідків;
- адаптація та відновлення;
- подальша діяльність інфраструктурного об'єкту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У минулому нашому дослідженні [1] ми сформували саме поняттєвий апарат, набувавшого актуальності в той час терміну «кібервідмовостійкість» та розглядали його забезпечення в контексті якісних показників та розподілу на домени, як окремі підструктури одиниці. Зокрема, раніше було з'ясовано, що найбільш комплексним для оцінки розглядуваної системи об'єкту є Шотландський фреймворк для державного сектору [5]. Головними критичними функціями кіберстійкості є:

- *Ідентифікація* – завчасний пошук індикаторів впливу, векторів атак, які можна використати, щоб проникнути у IT-екосистему.
- *Захист* – зменшення вразливих місць відповідно до вашої терпимості до ризику.
- *Виявлення* – виявлення індикаторів компрометації за допомогою аудиту в реальному часі, виявлення аномалій та попередження.
- *Відповідь* – швидкий збір та аналіз інформації про інцидент, задля прийняття обґрунтованих рішень щодо найкращого способу дій.
- *Відновлення* – швидке, точне та ефективне відновлення системи і даних.
- *Керування* – наскрізна функція, яка інформує та підтримує інших; наприклад, результати управління визначають пріоритетність засобів контролю безпеки.

Нижче проведена детальна апробація Шотландського фреймворку [6] для прототипу енергетичного об'єкту критичної інфраструктури України. А саме для системи розподілення.

Рис. 1. Оцінка кіберстійкості інфраструктурного об'єкту за визначений часовий період

Рис. 2. Тенденція оцінки відповідності існуючим стандартам за аналогічний період

Рис. 3. Виконання вимог домена Шотландського фреймворку для державного сектору

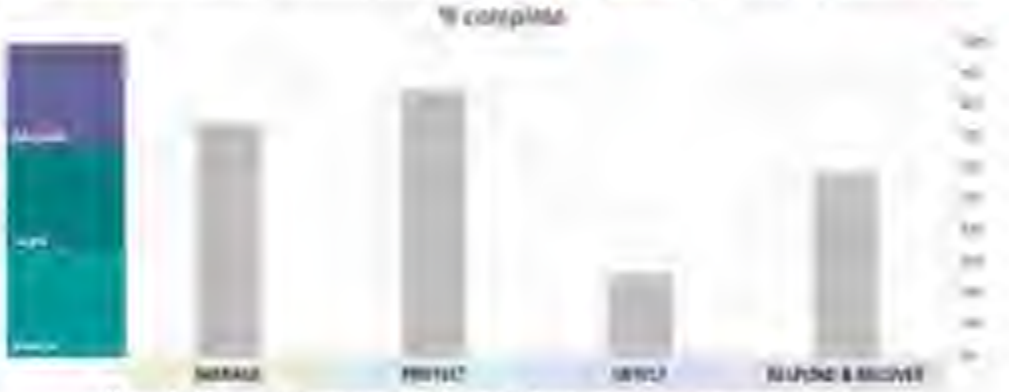


Рис. 4. Процес інтеграції вимог кіберстійкості на різних рівнях

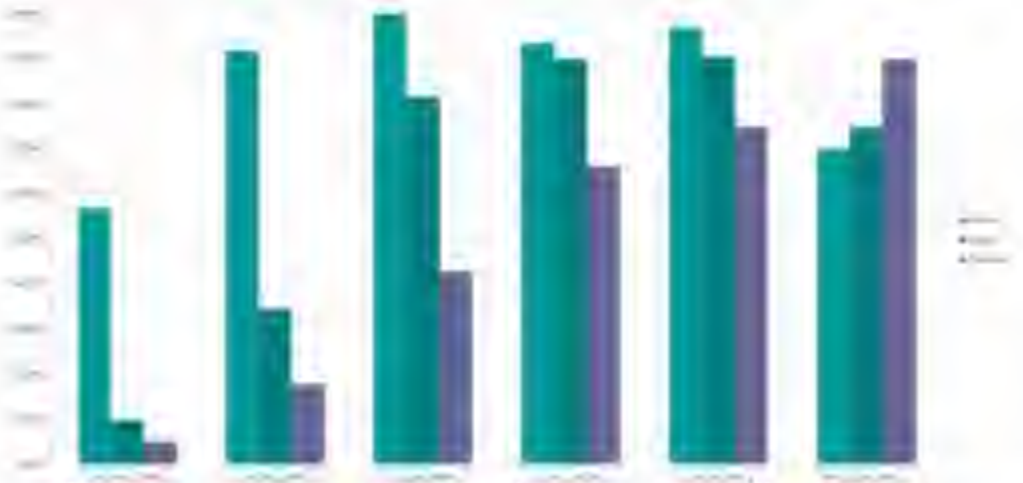


Рис. 5. Градація індикатора кіберстійкості за визначений часовий період

Водночас, незважаючи на розподіл та градацію якісних параметрів кіберстійкості, все ще залишилась невирішеною проблема кількісної оцінки кіберстійкості [1]. З моменту введення в широке застосування терміну «кіберстійкість», або ж «кіберрадомовстійкість» систем, акцент в її оцінці змінився з якісного характеру [7-8] на кількісну оцінку.

Тому, варто провести аналіз останніх фреймворків для оцінки кіберстійкості - саме в контексті кількісного підходу. Можна стверджувати, що з плином часу стала спостерігатися планомірна інтеграція кіберзахисту з кіберстійкістю. Певні підходи вже не розділяють ці два напрямки окремо, а розглядають як частини одного цілого. До того ж, вже з плином часу з'явилась необхідність саме пошуку підходів до кількісного аналізу.

Оскільки, шкода внаслідок кіберінцидентів вже напряму має вплив на цілі сектори держави та навіть навколишнє середовище, не кажучи вже про конкретні інфраструктурні об'єкти. Що ставить під загрозу не тільки фінансове питання, а й життєдіяльність цілих регіонів.

Тобто, в умовах коли мова йде не про сам захист від кібератаки, а відновлення об'єкта до прийнятного функціонального стану та надалі до штатного режиму роботи. І в такому контексті вже варто провести аналіз наявних та найбільш релевантних фреймворків, метрик чи систем для кількісної оцінки кіберстійкості.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика фреймворків для забезпечення кіберстійкості

Фреймворк	**Основні характеристики**	**Підходи та принципи**	**Мета та цілі**	**Ключові переваги в порівнянні з іншими**	**Сфера застосування**	**Кількісні показники для розрахунку**
Scottish Public Sector Cyber Resilience Framework	Відновлення, безперервне вдосконалення, кризове управління	Плани реагування, адаптація.	**Мета:** Забезпечення кіберстійкості в державному секторі. **Цілі:** Зниження наслідків кіберінцидентів, відновлення	Фокус на відновленні та безпеці державних структур.	Державний сектор, критична інфраструктура	Час відновлення після інцидентів, зменшення кількості інцидентів.
NIST Cyber Resilience Review (CRR)	Аналіз загроз, виявлення вразливостей, планування та відновлення.	Кризове управління, оцінка ризиків, сценарне тестування.	**Мета:** Покращення здатності до відновлення та стійкості. **Цілі:** Виявлення слабких місць, покращення планів відновлення.	Орієнтований на критичну інфраструктуру та виявлення потенційних загроз	Критична інфраструктура, організації з високими ризиками.	Час до відновлення після інциденту, кількість виявлених загроз.
ISO/IEC 27032	Захист критичної інфраструктури, тестування систем на проникнення.	Управління інцидентами.	**Мета:** Підвищення рівня кіберстійкості через виконання вимог міжнародних стандартів **Цілі:** Створення узгоджених підходів до кіберстійкості,	Інтеграція з іншими стандартами безпеки та кіберстійкості.	Міжнародні організації, критична інфраструктура	Кількість інцидентів, час відновлення.
Cyber Resilience Assessment Model (CRAM)	Сценарне моделювання, ризик-менеджмент	Оцінка стану функціональності та відновлення, стратегій після	**Мета:** Оцінка здатності до відновлення та покращення стійкості бізнесу. **Цілі:** Визначення недоліків у	Гнучкість в оцінці різних типів організацій та сценаріїв.	Бізнес-організації, малий та середній бізнес.	Відсоток відновлених бізнес-процесів, час повернення ключових процесів до

		інцидентів.	комунікацій бізнес-процесів.			функціонального стану.
Resilience Management Model (RMM)	Оцінка інфраструктури. довгострокова стабільність.	Визначення рівнів стійкості, аналіз інцидентів.	**Мета:** Побудова системи стійкості для організації на довгострокову перспективу. **Цілі:** Визначення рівнів стійкості. планування та відновлення.	Оцінка та планування стійкості для довгострокового розвитку.	Великі підприємства. організації з глобальними операціями.	Рівень стійкості. час на відновлення після інциденту.
BCI Cyber Resilience Framework	Відновлення ключових процесів. кризові плани.	Інтеграція з бізнес-процесами, підтримка критичних функцій	**Мета:** Забезпечення безперервності функціонування бізнес-процесів навіть у разі кіберінцидентів. **Цілі:** Зниження ризику зупинки критичних бізнес-функцій.	Інтеграція кіберстійкості в бізнес-процеси для швидкого відновлення робочих процесів	Великі та середні бізнеси. організації з критичними функціями	Час простою. час відновлення критичних функцій.
Axelos RESILIA Framework	Навчання персоналу. стратегії реагування.	Підвищення обізнаності. планування та прогнозування. соціальна інженерія.	**Мета:** Підвищення усвідомленості та обізнаності персоналу організації. **Цілі:** Формування культури кіберстійкості.	Фокус на поведінкових аспектах безпеки.	Великі та середні підприємства. освітні установи	Кількість проведених тренінгів. рівень обізнаності співробітників.
Cybersecurity Capability Maturity Model (C2M2)	Оцінка поточних можливостей. розвиток стратегій.	Покращення стабільності процесів. усунення слабких місць	**Мета:** Оцінка стабільності процесів кіберстійкості та безпеки. **Цілі:** Підвищення ефективності заходів безпеки та відновлення.	Модульна система. що дозволяє покращувати окремі аспекти стійкості.	Організації будь-якого масштабу. критичні сектори	Рівень функціональності процесів. час на відновлення. рівень збереження функціональності ключової місії.

Наведені методології оцінки кіберстійкості забезпечують структуровані підходи до визначення самих цілей безпеки. так і засобів контролю за відновленням прийнятного робочого стану системи/підприємства/об'єкта. Зокрема. у вищезгаданих фреймворках узгоджуються сформульовані раніше якісні критерії з актуальними ключовими кількісними показниками. При цьому. частина з цих систем все-таки все ще балансує на межі понять «кібербезпека» та «кіберстійкості» Однак. все ще відкритим залишається питання підбору показників та метрик для оцінки.

Результати дослідження. Як бачимо проведений аналіз показав. що наразі розробники та аналітики фреймворків демонструють необхідність комплексного підходу до забезпечення захисту. а не розділення кібербезпеки та кіберстійкості - як двох окремих концепцій. Та також той факт. що незважаючи на часовий та методологічний прогрес. все ще не існує чітких критеріїв для

розрахунків. Це насамперед пов'язано з бажанням розробників до комерціалізації та відсутності чітких державних регуляторів *(в англомовній літературі - роль «супервізора» з домінуючими правами та рівнями доступу до центрального управління)*. Що призводить до намагання створити «універсальний» механізм для стримування та застосування його на усі сектори та галузі.

Однак, як наглядно продемонстрували останні події (як українські [9], так і європейські) кіберінциденти в енергетиці, транспорту та військовому секторах мають абсолютно різні характери. В двох останніх ціллю стійкості стоїть забезпечення мінімальної шкоди від прямого процесу ураження. В той час як в енергетичному секторі в першу чергу страждають такі критичні функції як розподіл та транспортування електроенергії, оскільки ці аспекти ключової місії повинні бути неперервними, бо як відомо електроенергія не має як такого у звичайному розумінні накопичуваного ефекту. Тому, в першу чергу має бути розглянутий підхід до забезпечення кіберстійкості саме на терені української енергетики [10]. Пропонується розподіл на критичність та порядок реагування на події в кіберпросторі. Виходячи із даної тенденції, можна виділити такі основні кількісні параметри для оцінки кіберстійкості об'єктів критичної інфраструктури різного характеру.

1. Середній час відновлення (MTTR)

- Розрахунок: Загальний час простою / Кількість інцидентів

- Ситуація: Атака програми-вимагача на систему управління підстанції розподілу електроенергії розпочалась о 10:00 ранку. При цьому повний контроль доступу до керування було відновлено о 18:00. Отже, сумарний час простою системи склав 8 годин. Оскільки, за цей часовий проміжок був зафіксований один кіберінцидент, тому MTTR буде становити: 8 годин / 1 інцидент = 8 годин

2. Цільовий пункт відновлення (RPO)

- Розрахунок: Даний показник не є результатом обчислення, а передбачає за собою конкретне значення. Зокрема, RPO встановлюється згідно впливу загрози/атаки на саму систему.

- Ситуація: Дані з контролерів одного з метрологічного контурів інфраструктурного об'єкта передаються на робочу станцію та архівуються з інтервалом у 30 хвилин. Отже, у разі виникнення інциденту, що приведе до втрати даних або проблем з архівуванням нових даних, метою та ціллю (кіберстійкості) є відновлення до стану, який є останнім у відношенні актуального робочого стану зразка не пізніше ніж на 30 хвилин. Таким чином, для заподіянню цьому типу кіберінцидентів запроваджується реплікація даних, встановлення додаткових незалежних точок зберігання інформації та застосування резервного копіювання з інтервалом не менш ніж кожні 30 хвилин.

3. Цільовий час відновлення (RTO)

- Розрахунок: Даний показник також є визначеною ціллю, а не результатом обчислення. Він представляє максимально допустимий прийнятний час для відновлення критичних функцій об'єкта після інциденту.

- Ситуація: Підстанція розподілення електроенергії має RTO у 2 години для своєї основної системи управління. Водночас, підстанція підтримує резервну систему керування та має детальний план відновлення після інцидентів/аварій, щоб відповідати даному показнику RTO. Після змодельованої, або як імітованої атаки персонал підстанції ініціює перехід на резервну систему управління та відстежує час, який необхідний для відновлення загальної системи до прийнятного стану – тобто, до коректного функціонування основних критичних функцій розподілу між споживачами. Таким чином, досягнення 2-годинної цілі в таких сценаріях демонструє прагнення персоналу підстанції мінімізувати перебої в доставленні електроенергії до кінцевого споживача та належному розподілі.

4. Безперервність системних процесів (SPC)

- Розрахунок: (Кількість функціональних/відновлених критичних процесів / Загальна кількість критичних процесів) * 100%

- Ситуація: Оператор енергосистеми визначив п'ять ключових процесів, критично важливих для підтримки стабільності мережі. Під час змодельованої атаки оператор оцінив, що після відновлення протягом 4 годин чотири з п'яти критичних процесів були повністю функціональними. Це призвело такого показника SPC: 4 / 5 * 100% = 80% .

5. Відсоток збереження функціональності ключової місії

- Розрахунок: Оцінюється шляхом визначення доступності та продуктивності критичних систем і служб. Зокрема, з використанням порівняльних функцій на основі індикатора критичності (про це далі у статті) для важливого компонента системи.
- Ситуація: Енергетичне підприємств визначило три основні функції місії та привоїло їм вагові коефіцієнти: Розподільча система (40%), Інформаційна система моніторингу показників (30%) та Транспортування електроенергії (30%). Після кібератаки на об'єкт критичної інфраструктури було оцінено функціональність кожної із підсистем: Розподільча система працювала на 50%, Інформаційна система моніторингу показників не працювала (0%), а Транспортування електроенергії працювало з незначними перебоями, тобто – умовно на 90%. Загальний відсоток збереження функціональності ключової місії об'єкта інфраструктури склав (0.50 * 40%) + (0.00 * 30%) + (0.90 * 30%) = 47% .

Узагальнюючи, ці основні кількісні критерії демонструють, як кількісно на даному етапі розвитку оцінюються ключові аспекти кіберстійкості у різних фреймворках в контексті об'єктів критичної інфраструктури. Зокрема, у нашому випадку – у контексті енергетичної сфери. Тому, показники, критерії, конкретні цілі та методи забезпечення прийнятного стану функціонування будуть відрізнятися залежно від галузі, організації та конкретних ризиків.

Тепер, як було вже згадано вище, потрібно розібратися з класифікацією потенційних інцидентів, зокрема з їх рівнем критичності, типами та категоріями. Для побудови наступних аналітичних таблиць були використані дані з власних джерел, зокрема типових політик українських об'єктів критичної інфраструктури.

Таблиця 2. Класифікація інцидентів

Категорія інциденту	**Тип інциденту**	**Опис інциденту**
Шкідливий вміст контенту	Спам	Надсилання зловмисних повідомлень, або ж великої кількості таких повідомлень.
Шкідливий програмний код	Розповсюдження шкідливого програмного забезпечення (далі – ШПЗ)	Виявлення у системі застосунків/програм/утиліт з шкідливим програмним кодом.
	Підміна команд у центрі управління	Мережа ботів (ботнет) в якості збору інформації
Збір інформації	Шкідливе підключення	Підключення від мережі з наявним ШПЗ, або ж ботнету.
	Моніторинг	Збір інформації про стан та характеристики системи/мережі (їх компонентів).
	Сніфінг та фішинг	Несанкціоноване перехоплення, моніторинг, читання та аналіз мережевого трафіку. Застосування методів соціальної інженерії задля збору інформації
Несанкціоноване проникнення	Експлуатація вразливості	Використання наявних вразливостей у системі, або ж мережі.

	Автентифікація у системі управління	Використання служб та ресурсів системи для отримання доступу та подальшої авторизації у системі.
Втручання	Компрометація облікових профілів користувачів з різними ролями	Безпосереднє вторгнення у систему, або її компоненти, шляхом отримання облікових даних.
Порушення доступності	DDoS атака (на відмову в обслуговуванні)	Перевантаження пропускної можливості ресурсу системи.
	Саботаж/шкідливі дії/збій роботи системи	Пряме пошкодження інформації, переривання функціональних процесів компонентів та підрозділів системи
Порушення цілісності інформації	Несанкціонований доступ	Витік інформації із інформаційних ресурсів системи.
	Несанкціонована модифікація	Зміна інформаційних ресурсів системи.
Шахрайські дії	Шахрайський ресурс	Впровадження та розгортання в системі програмних засобів з ціллю підміни використання ресурсів, відмінних від передбачуваних
Пасивна вразливість	Вразливість	Відкриті для експлуатації вразливості у системі, чи її компонентах (структурних підрозділах, одиницях, тощо).
	Неправильне налаштування/конфігурація	Некоректно задані умови та налаштування системи (її компонентів), якими може скористатися зловмисник, або ж ШПЗ.
Невідоме та інше	Нової невідомої раніше формації/типу інцидент. Або ж невизначена подія втручання	Відсутність або недостатність об'єму даних для аналізу/обробки інциденту, які необхідні для подальшої реакції.

Таблиця 3. Узагальнена класифікація кіберінцидентів за рівнем критичності

Рівень критичності кіберінциденту	Загроза	Загальний стан
Некритичний (білий)	Можливий потенційний негативний вплив на сталий стан локальних компонентів	Кіберінцидент не загрожує штатному режиму роботи систем інфраструктурного об'єкта
Низький (зелений)	Загрози конфіденційності, цілісності і доступності інформації та даних, що обробляються всередині систем, немає.	Кіберінцидент безпосередньо загрожує безперервній та надійній роботі локальних підсистем низького рівня на об'єкті/підприємстві.
Середній (жовтий)	Є загроза створення передумов для порушення захищеності потоків інформації, що може призвести до тимчасового припинення роботи функцій цілих систем об'єкта критичної інфраструктури.	Кіберінцидент безпосередньо загрожує штатному режиму інформаційно-комунікаційних та технологічних систем на об'єкті.
Високий (помаранчевий)	Є потенційна загроза для критичних функцій об'єкта критичної інфраструктури. Зокрема, що може мати негативний вплив навіть на рівень національної безпеки, стану навколишнього середовища та економічного сектору.	Кіберінцидент напряму впливає на надійність, стійкість та саму здатність критичного об'єкта до відновлення. Повернення рівня функціональності критичної інфраструктури до прийнятного робочого стану може потребувати задіяння декількох суб'єктів національної системи безпеки (кібербезпеки).
Критичний (червоний)	Прямий негативний вплив не тільки на цілісність потоків інформації та даних, роботу систем, а й загалом на можливість об'єкта до функціонування як такої. Наслідки кібератаки можуть призвести до безпосередньої шкоди для сфери національної безпеки, природи та завдяки тимчасового припинення життєдіяльності цілих критичних сфер державного рівня.	Кіберінцидент прямо загрожує роботоздатності стану об'єкта критичної інфраструктури та несе за собою повне припинення виконання основних функцій та послуг. Відбиття атаки та подальше відновлення від інциденту потребує безпосереднього залучення ключових суб'єктів національної безпеки та системи кіберзахисту державного рівня.

Надзвичайний (чорний)	Повне припинення функціонування об'єкта критичної інфраструктури. Несе під собою транскордонний характер загрози. Призводить до прямого фізичного руйнування інфраструктури, витоку чутливої таємної інформації та непоправної репутаційної/фінансової/ресурсної шкоди.	Кіберінцидент повністю перешкоджає або унеможливлює хоча б якийсь мінімальний стан функціонування критичного сектору. Потребує залучення усіх внутрішніх та зовнішніх ресурсів на державних рівнях.

На момент останнього аналітичного дослідження, найбільш комплексною системою для оцінки (точніше, для аналізу) кіберстійкості було визначено Шотландський фреймворк. Проте, часова тенденція містила акцент з реагування на домени та категорії – на оцінку рівня адаптивності та відновлення після кіберінциденту. Зокрема, акцентованість саме на енергетичному секторі притаманна не лише для України

Рис. 6. Сфера застосування фреймворку C2M2 [11]

Виявлено, що ще не існує чіткого концептуального підходу до реагування кіберінцидентів у різних сферах критичної інфраструктури. Оскільки, вищезгадані фреймворки та актуальні релевантні метрики для оцінювання [12-13] акцентують свою увагу саме на розподілі функцій за категоріями та ролях у напрямку виконання конкретних вимог до забезпечення кіберстійкості, однак при цьому не пропонують алгоритм реакції та протидії.

Провівши аналіз на основі на власних джерел, було запропоновано наступний порядок управління при кіберінциденті з «суперлайфером» у головній ролі. Враховуючи специфіку енергетичного сектору України та необхідності насамперед забезпечення процесу відновлення до прийнятного функціонального режиму роботи інфраструктурного об'єкта отримуємо наступний алгоритм дій

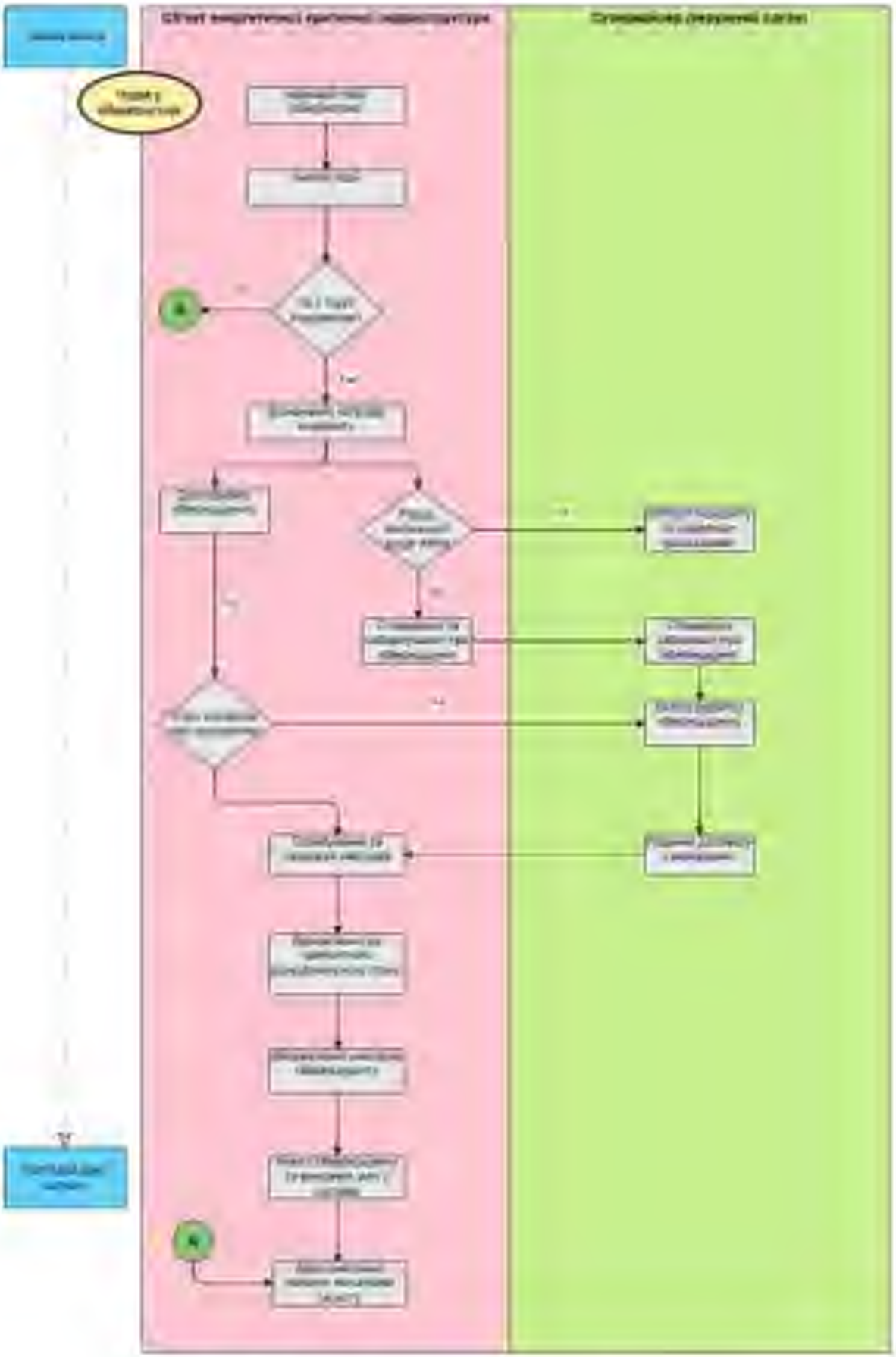


Рис. 7. Порядок реагування на потенційний інцидент

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Проведений аналіз актуальних фреймворків та систем для оцінки кіберстійкості підтверджує тенденцію зміщення акценту з якісних показників на кількісні. В першу чергу, останні метрики зосереджені на прогнозуванні та адаптації до виникаючих умов, тобто до планування на випадок надзвичайних ситуацій чи інцидентів.

Водночас, можна стверджувати, що оцінка показників кіберстійкості безпосередньо та прямо залежить від характеру інцидентів та подій. Тому, при визначенні набору кількісних показників для конкретного об'єкта критичної інфраструктури необхідно враховувати специфіку, характер та критичність відповідних загроз, що несуть потенційний негативний вплив на критичну інфраструктуру. Тим не менше, універсальними критеріями для більшості об'єктів (та їх внутрішніх систем) є MTTR, RPO, RTO, SPC та відсоток збереженої функціональності ключової місії об'єкта/підприємства, які дають цінну кількісну інформацію для подальшого процесу відновлення. Даний матеріал дає підґрунтя для подальшого застосування та розрахунку показників кіберстійкості в комплексі з моделюванням, тобто вже на основі прототипів реальних інфраструктурних об'єктів та систем. Проведений аналіз формує фундамент для подальших досліджень в контексті моделювання процесу відновлення інфраструктури з точки зору відпрацювання систем управління задля покращення атак відмови на енергетичні системи.

Стаття висвітлює стан сучасних фреймворків та метрик для оцінки кіберстійкості. Усі вони спеціалізуються на підході Data-driven, а саме на методах експертних оцінок. Тобто, розглядують кіберстійкість як якісний показник. Проте, як демонструють актуальні події у сфері кіберінцидентів даного підходу вже замало. Нарази гостро постає питання необхідності вирішення проблеми оцінювання кіберстійкості на основі моделей, які ґрунтуються на фундаментальних поняття резильєнтності як адаптивній властивості інфраструктурних об'єктів. Таким чином, наступним кроком до створення механізму кількісної оцінки індикатора кіберстійкості реальних об'єктів має стати перехід до підходу Model-driven, тобто до метамоделювання [14-15]. Це вимагає включення загальних понять категорій стійкості до певної структурованої моделі, на основі підходу MOF. А саме вираження концепцій кіберстійкості мовою UML, з подальшою можливістю переходу до рівня кількісної моделі конкретної області (у даному випадку – енергетичного сектору), з подальшим застосуванням інструментів ймовірнісної оцінки параметрів та розрахунку функціональних станів критичних функцій. Наприклад, таких як: Баєсові мережі, або кольорові мережі Петрі.

Список бібліографічного опису:

1 Гальчинський Л., Лучик В. (2023) Метрики оцінки кіберрезильєнтності: аналітичне огляд-ове дослідження. Інформаційні технології та суспільство. 2 (3). 27–33. https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.2.3

2 Про внесення змін до деяких законів України щодо захисту інформації та кіберзахисту державних інформаційних ресурсів, об'єктів критичної інформаційної інфраструктури. URL: https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/44275.

3 Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF.

4 Kott, A., & Linkov, I. (2018). Cyber resilience of systems and networks. Springer. / Edited by Alexander Kott, Igor Linkov. 1st ed. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-77492-3

5 Харченко К., & Гальчинський, Л. (2022) ОЦІНЮВАННЯ КІБЕРСТІЙКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ. Collection of scientific papers «SCIENTIA». (November 11, 2022. Vilnius, Lithuania). 118-120.

6 Government of Scotland. (2024) *Cyber Resilience in the Public Sector: Framework for Improving Cyber Resilience.* URL: https://www.gov.scot/publications/scottish-public-sector-cyber-resilience-framework-v2-0/pages/2/

7 Linkov, I. & Palma-Oliveira, J. (eds) (2017) Resilience and Risk: Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains. Springer

8 Resilience metrics for cyber systems / I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde, T.P. Seager, J. Allen, A. Kott. 2013. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-013-9485-y.

9 State Service for Special Communications and Information Protection of Ukraine / Analytical Materials of the SSSCIP WAR AND CYBER: THREE YEARS OF STRUGGLE AND LESSONS FOR GLOBAL SECURITY. SSSCIP & ICT. TASK FORCE. 2025. URL: https://www.cip.gov.ua/ua/statics/analitichni-materiali-derzhspeczv-va/ru.

10 Про затвердження Вимог до кіберзахисту інформаційних та керуючих систем ядерних станцій для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/0395-22#Text.

11 U.S. Department of Energy (DOE). (2014). *Cybersecurity Capability Maturity Model (C2M2).* URL: http://energy.gov/oe/cybersecurity-capability-maturity-model-c2m2

12 Bodeau, D.J.; Graubart, R.D.; McQuaid, R.M.; Woodill, J. (2018). Cyber Resiliency Metrics, Measures of Effectiveness, and Scoring: Enabling Systems Engineers and Program Managers to Select the Most Useful Assessment Methods: Technical Report. Mitre Corp Bedford Ma Bedford United States: McLean, VA, USA

13. Bodeau, D.J., Graubart, R.D., McQuaid, R., & Woodill, J. (2018). Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice Use Case Methodology and Examples
14. Bellini, E., Marrone, S., Marulli, F. Cyber Resilience Meta-Modelling. The Railway Communication Case Study. Electronics 2021, 10, 583. http.// doi.org/10.3390/electronics10050583
15. Salvi, Andrea & Spagnoletti, Paolo & Noori, Nadia S. (2021). Cyber-resilience of Critical Cyber Infrastructures: Integrating digital twins in the electric power ecosystem. Computers & Security. 112. 102507. 10.1016/j.cose.2021.102507

References

1. Galchynsky, I., & Lychyk, V. (2023). Cyber resilience assessment metrics (analytical and review research). Information Technology and Society, (2 (8), 27-33. doi:10.32689/maup.it.2023.2.3 (in Ukrainian)
2. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo zakhystu informatsii ta kiberzakhystu derzhavnykh informatsiinykh resursiv, obiektiv krytychnoi informatsiinoi infrastruktury. URL: https://rada.gov.ua/bulletin/Bills/Card/44275 (in Ukrainian).
3. Pro zatverdzhennia Zahalnykh vymoh do kiberzakhystu obiektiv krytychnoi infrastruktury. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF (in Ukrainian).
4. Kharlamova, K., & Galchynsky, I. (2022). ASSESSING THE CYBER RESILIENCE OF CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES IN UKRAINE. Collection of scientific papers «SCIENCE». (November 11, 2022. Vilnius, Lithuania). 118-120 (in Ukrainian)
5. Government of Scotland. (2024). Cyber Resilience in the Public Sector: Framework for Improving Cyber Resilience. URL: https://www.gov.scot/publications/scottish-public-sector-cyber-resilience-framework-v2-0/pages/2/.
6. Kott, A., & Linkov, I. (2018). Cyber resilience of systems and networks. Springer / Edited by Alexander Kott, Igor Linkov. 1st ed. Springer International Publishing. doi 10.1007/978-3-319-77492-3
7. Linkov, I., & Palma-Oliveira, J. (eds.) (2017). Resilience and Risk: Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains. Springer.
8. Resilience metrics for cyber systems / I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde, T. P. Seager, J. Allen, A. Kott. 2013. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-013-9485-y
9. State Service for Special Communications and Information Protection of Ukraine / Analytical Materials of the SSSCIP. WAR AND CYBER: THREE YEARS OF STRUGGLE AND LESSONS FOR GLOBAL SECURITY. SSSCIP & ICT TASK FORCE. 2025. URL: https://www.cip.gov.ua/ua/statti/analitichni-materiali-derzhspeczv-yazku.
10. Pro zatverdzhennia Vymoh do kiberzakhystu informatsiinykh ta keruiuchykh system atomnykh stantsii dlia zabezpechennia yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-22#Text (in Ukrainian)
11. U.S. Department of Energy (DOE). (2014). Cybersecurity Capability Maturity Model (C2M2). URL: http://energy.gov/oe/cybersecurity-capability-maturity-model-c2m2.
12. Bodeau, D.J.; Graubart, R.D.; McQuaid, R.M., Woodill, J. (2018). Cyber Resiliency Metrics, Measures of Effectiveness and Scoring: Enabling Systems Engineers and Program Managers to Select the Most Useful Assessment Methods.Technical Report. Mitre Corp Bedford Ma Bedford United States. McLean, VA, USA
13. Bodeau, D.J., Graubart, R.D., McQuaid, R., & Woodill, J. (2018). Cyber Resiliency Metrics and Scoring in Practice-Use Case Methodology and Examples.
14. Bellini, E.; Marrone, S.; Marulli, F. Cyber Resilience Meta-Modelling: The Railway Communication Case Study. Electronics 2021, 10, 583. http.// doi.org/10.3390/electronics10050583
15. Salvi, Andrea & Spagnoletti, Paolo & Noori, Nadia S. (2021). Cyber-resilience of Critical Cyber Infrastructures: Integrating digital twins in the electric power ecosystem. Computers & Security. 112. 102507. 10.1016/j.cose.2021.102507.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-03
УДК 004.42:519.86
Андрушак Ігор Євгенович, д.т.н., професор
http://orcid.org/0000-0002-8751-4420
Вакулюк Іванна Володимирівна, магістр
https://orcid.org/0009-0000-5478-7716
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ПЕРСОНАЛЬНЕ БЮДЖЕТУВАННЯ: АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

Андрушак І. Є., Вакулюк І. В. Персональне бюджетування: аналіз програмних рішень та оптимізаційних можливостей. У сучасних умовах розвитку цифрових технологій та широкого впровадження інтернет-банкінгу стрімко зростає популярність безготівкових розрахунків і використання електронних банківських сервісів. Це, своєю чергою, стимулює інтерес до засобів персонального бюджетування та фінансового планування, що дають змогу ефективніше контролювати витрати, формувати заощадження і досягати довгострокових цілей, а також привнесе обґрунтовані фінансові рішення людям. У статті здійснено аналіз п'яти популярних мобільних застосунків для персонального бюджетування, розглянуто їх функціональні можливості, переваги та обмеження. Досліджено наявність вбудованих механізмів для бюджетного планування, постановки фінансових цілей, моніторингу витрат і доходів, а також інструментів для автоматизованого розподілу коштів. Особливу увагу приділено методам оптимізації бюджету за допомогою сучасних математичних методів. У статті розглянуто можливість інтеграції симплекс-методу лінійного програмування в мобільні застосунки для персонального фінансового планування з метою формування бюджету в умовах обмежених ресурсів та досягнення кількох фінансових цілей. Представлено приклад розв'язання задачі оптимального розподілу витрат з використанням мови програмування Python та бібліотеки scipy.optimize. Показано можливість імплементації цієї моделі в мобільний додаток Android за допомогою плагіна Chaquopy. У межах дослідження також розглянуто сучасні наукові джерела з тематики фінансової грамотності, поведінкових фінансів та психологічних аспектів управління грошовими потоками, зокрема теорію ментальної бухгалтерії. Також, проведено огляд літератури з тематики програмних засобів і математичних методів. Отримані результати можуть стати основою для створення ефективніших мобільних застосунків з функціями адаптивного бюджетування.

Ключові слова: персональне бюджетування, мобільні застосунки, оптимізація, фінансова грамотність, лінійне програмування

Andrushchak I., Vakulyuk I. Personal Budgeting: Analysis of Software Solutions and Optimization Opportunities. In the current context of rapid digital technology development and widespread adoption of internet banking, the popularity of cashless transactions and electronic banking services is growing significantly. This trend, in turn, stimulates interest in personal budgeting and financial planning tools, which enable users to better control expenses, build savings, achieve long-term goals, and make informed financial decisions on a daily basis. This article presents an analysis of five popular mobile applications for personal budgeting, evaluating their functionality, advantages, and limitations. The study examines the presence of built-in mechanisms for budget planning, goal setting, income and expense monitoring, and tools for automated fund allocation. Particular attention is given to the issue of budget optimization using modern mathematical methods. The article explores the potential integration of the simplex method of linear programming into mobile applications for personal financial planning, aiming to create budgets under resource constraints and meet specific financial objectives. A practical example of solving an optimal expense allocation problem using the Python programming language and the scipy.optimize library is provided. The implementation of this model into an Android application via the Chaquopy plugin is also demonstrated. The study considers modern literature on financial literacy, behavioral finance, and psychological aspects of money management, including Thaler's theory of mental accounting. Additionally, it reviews relevant sources on software tools and mathematical methods. The results may serve as a basis for developing more effective mobile applications with adaptive budgeting functionality.

Keywords: personal budgeting, mobile applications, optimization, financial literacy, linear programming

Постановка проблеми. Фінансова поведінка глибоко вкоренена в нашому житті, але для багатьох людей її успіх залишається проблематичним. Останні роки показують, що все більше користувачів цікавляться тим, як ефективніше керувати власними фінансами – і статистика це підтверджує. У 2023 році світовий ринок мобільних додатків для управління особистими фінансами сягнув $101,75 мільярда і, за прогнозами, зросте до $675,08 мільярда до 2032 року, що відповідає середньорічному темпу зростання (CAGR) 23,4% [1]. Для порівняння, глобальний ринок відео- та аудіо-стримінгових сервісів, таких як Netflix і Spotify, у 2023 році оцінювався в $106,8 мільярда, що лише трохи перевищує розмір ринку мобільних застосунків для бюджетування. Крім того, обсяг транзакцій через мобільні платіжні додатки досяг $7,39 трильйона у 2023 році, що підтверджує активне використання цифрових фінансових сервісів у світі [2].

Незважаючи на це, рівень фінансової грамотності в Україні залишається порівняно низьким. Згідно з дослідженням, проведеним Національним банком України у співпраці з проектом USAID у 2021 році, індекс фінансової грамотності українців склав лише 12,3 бала з 21 можливого [3]. І це

означає, що багато людей не мають достатніх знань для управління власними фінансами, навіть за наявності доступу до відповідних інструментів.

Більшість існуючих мобільних застосунків для персонального бюджетування здебільшого зосереджені на обліку витрат і доходів, але не в повній мірі забезпечують функціонал для планування бюджету, досягнення фінансових цілей та оптимального розподілу коштів. Це створює можливості для вивчення та інтеграції нових підходів, наприклад методів математичної оптимізації, таких як лінійне програмування. Це, ймовірно, позитивно вплинуло б на досвід користувачів і сприяло б зростанню їх фінансової грамотності.

Аналіз актуальних досліджень та публікацій. В рамках дослідження важливо звернути увагу на існуючі наукові праці в обраній предметній області. До прикладу, у статті О. Артюшенка [4] розглядається використання математичних методів оптимізації, зокрема лінійного програмування, для розподілення обмежених фінансових ресурсів між різними видами діяльності військових частин. Хоча тематика пов'язана з армією, це перегукується з ідеєю даної статті – йдеться про оптимальний розподіл обмеженого бюджету між різними потребами, саме з використанням лінійного програмування. Схожий підхід простежується і в дослідженні Н.К. Оладеджо та А. Аболарини [5], де проаналізовано застосування методу лінійного програмування для оптимізації прибутку виробничої галузі на прикладі пекарні університету Landmark. Автори продемонстрували, що використання цього методу дозволяє не лише максимізувати прибуток, але й мінімізувати витрати на виробництво. Отже, хоча ідея поєднати персональне бюджетування з методами математичної оптимізації виглядає інноваційно, насправді вона має певні теоретичні й практичні передумови в наукових роботах, хоч і не прямо у сфері мобільних застосунків для особистих фінансів.

Окремо варто згадати роботу М. Аленази [6], який з колегами проаналізував 45 найпопулярніших застосунків для бюджетування, відібраних з понад 1300 доступних у Google Play та App Store. Вони досліджували, як саме працює функціонал, зокрема з точки зору теорії ментальної звітності. Виявилось, що майже всі додатки вміють відстежувати витрати, але лише близько третини з них дозволяють реально планувати бюджет – наприклад, за методом "конвертів". Цей висновок особливо важливий для даного дослідження, адже саме вдосконалення можливостей бюджетного планування є його основною ідеєю.

Метою роботи є аналіз фінансових мобільних додатків і їхній функціонал для персонального бюджетування та розгляд можливості інтеграції методів математичної оптимізації, зокрема лінійного програмування.

Виклад основного матеріалу. Перед початком аналізу існуючих фінансових додатків необхідно краще зрозуміти, як люди ставляться до грошей та управління ними на психологічному рівні. Наші фінансові рішення рідко бувають повністю раціональними – ми спираємось на звички, емоції та внутрішні установки. Саме ці механізми пояснює теорія ментальної звітності, запропонована економістом Річардом Талером. Згідно з цією теорією, люди не сприймають гроші як щось єдине. Замість цього, ми підсвідомо створюємо рахунки або категорії «в голові». Наприклад, доходи поділяються на зарплату, премію, подарункові гроші, а витрати на збереження, обов'язкові витрати, розваги та інше. Це схоже на «фінансові шухляди» в голові і гроші з однієї категорії витрачаються легше ніж з іншої. Талер наводить приклад: якщо людина отримала 1000 грн як подарунок, вона з більшою ймовірністю витратить їх на щось приємне, ніж якби це були 1000 грн з зарплати – бо в голові ці гроші належать до різних "рахунків", хоча це однакові витрати з економічної точки зору. Також цікаво, що люди витрачають більше грошей на покупки кредитною картою, оскільки порівнюють ціну з малою кількістю ресурсу (в гаманці) або великою (на банківському рахунку). В другому випадку знижується поріг чутливості [7].

На основі такої психології виник і метод "конвертів" – метод управління фінансами, коли людина розподіляє бюджет на категорії (їжа, транспорт, відпочинок тощо) і відкладає певну суму в кожну з них – раніше буквально в конверти. Сьогодні цей метод адаптовано у додатках для ведення бюджету, де можна створювати віртуальні "конверти" і слідкувати, скільки залишилось у кожному. Це дозволяє краще контролювати витрати та уникати імпульсивних покупок – адже якщо в "конверті на каву" залишилось 0 гривень, значить, кава сьогодні не передбачена.

Такий підхід, що враховує психологію користувача, варто враховувати при аналізі функціоналу мобільних сервісів для бюджетування. Водночас важливо перевірити не лише наявність категорій витрат, а й те, чи підтримують застосунки функціонал, що допомагає користувачеві раціонально розподіляти кошти між цими «категоріями-конвертами» – що, власне, і стане основою запропонованого методу.

Для аналізу було використано 5 мобільних застосунків, загальні характеристики яких відображені на таблиці 1, а функціональні можливості – на таблиці 2. Вибір додатків був обумовлений їх популярністю та високим рейтингом серед користувачів. Проведений аналіз доцільний для розробників, адже він виявляє відсутні функції відповідних сервісів та можливості удосконалення. Всі оглянуті застосунки володіють унікальними характеристиками, які відрізняють їх від інших на ринку. У YNAB, користувач, уперше відкривши додаток, проходить цікавий процес налаштування через опитування. Додаток задає питання, наприклад, про середні витрати на їжу не вдома або ціну за тарифний план, щоб автоматично створити категорії витрат, що відповідають його звичкам. Цей процес швидкий і легкий, що допомагає користувачу почати працювати з додатком без зайвих складнощів. MonеyFy є найпростішим серед усіх, проте має дуже зрозумілий та інтуїтивний інтерфейс. Всі основні функції зібрані на одній сторінці: додавання транзакцій, відображення категорій і одразу секторна діаграма з розподілом витрат, а також загальний прибуток та витрати за місяць. Саме ця можливість не переходити між численними екранами і є причиною його популярності. Spendee та Wallet відрізняються сучасним і естетичним інтерфейсом, а також надають деталізований перелік категорій.

Попри різноманітність інтерфейсів та функціоналу, лише два з проаналізованих додатків демонструють наявність механізму планування та розподілу бюджету. В результаті огляду вдалося прослідкувати, на яких методах управління бюджетом вони побудовані. Зокрема, YNAB створений на основі zero-based budgeting – стратегії, що базується на принципі «дай кожній гривні роботу» (англ. give every dollar a job). Кожна гривня має своє призначення, після внесення доходу всі кошти розподіляються по категоріях витрат або заощадженнях, і на балансі не повинно залишатися нічого. Натомість застосунок GoodBudget є класичним прикладом використання методу конвертів, згаданого раніше. У той же час інші додатки не містять такого функціоналу і зосереджені лише на обліку бюджету – відстеженні доходів та витрат.

Таблиця 1. Загальні характеристики мобільних застосунків для фінансового обліку

Назва додатку	Загальні характеристика				
	Мова інтерфейсу	Доступність та ціна	Інтеграція з банком	Платформи	Фінансова стратегія
You Need A Budget (YNAB)	Лише англійська.	Повністю платний 130$ на рік (34 дні пробного періоду).	Інтеграція з банками США (Plaid). Інші транзакції – вручну.	Android, iOS, Web.	Zero-based метод
GoodBudget	Лише англійська.	Безкоштовна версія з обмеженнями (до 10 конвертів) та преміум – 84$ на рік.	Відсутня – дані вводяться вручну або імпортуються.	Android, iOS, Web.	Метод конвертів.
MonеyFy	Українська, англійська та інші мови.	Безкоштовна версія з основними функціями та преміум – 70$ рік.	Відсутня – дані вводяться вручну або імпортуються.	Android, iOS	Не прослідковується.
Spendee	Англійська та інші (українська відсутня)	Повністю платний, версія plus 20$ рік, premium – 35$ рік	Понад 2500 банків в Україні Monobank, Ощадбанк, e-Wallet	Android, iOS, Web.	Не прослідковується
Wallet (BudgetBakers)	Українська, англійська та інші мови.	Безкоштовна версія з основними функціями: преміум – 17$ на рік	Понад 15000 банків в Україні, Monobank, Ощадбанк, PayPal.	Android, iOS, Web.	Не прослідковується

Таблиця 2. Функціональні можливості мобільних застосунків для фінансового обліку.

Назва додатку	Функціональні можливості				
	Категорії для планування витрат і доходів	Розподіл бюджету	Оптимізація бюджету	Графіки/ аналітика	Цікаві функції
You Need A Budget (YNAB)	Повноцінні з можливістю встановлення пріоритетів та періодичності	Користувач може сам розподілити дохід або автоматично (відповідно до пріоритетів).	Відсутня.	Інтерактивні графіки для аналізу витрат, порівняння плану та факту, оцінки прогресу по цілях.	1) Встановлення фінансових цілей з трекінгом прогресу. 2) Навчальні матеріали, відео, статті, підказки.

Продовження таблиці 2.

Назва додатку	Функціональні можливості				
	Категорії для планування витрат і доходів	Розподіл бюджету	Оптимізація бюджету	Графіки/ аналітика	Цікаві функції
GoodBudget	"Конверти" для різних категорій.	Після внесення доходу, кошти автоматично розподіляються між конвертами.	Відсутня.	Простий візуальний звіт по категоріях: діаграми витрат, кільшків.	Можна спільно використовувати бюджет.
MoneyFy	Наявні категорії, але немає функції планування, не можна встановити ліміт.	Відсутній.	Відсутня.	Лише секторна діаграма, що показує відсоток витрат по категоріях.	Відсутні.
Spendee	Велика кількість категорій і тегів. Планування через створення окремих бюджетів для категорій.	Можна створювати кілька бюджетів і включати до них категорії, але доходи не розподіляються автоматично	Відсутня.	Різноманітні графіки: динаміка витрат з часом, аналіз по категоріях, порівняння план-факт та інше.	1) Підтримка криптогаманців. 2) Спільні гаманці для сімейного бюджету 3) Підтримка мультивалютності
Wallet (BudgetBakers)	Велика кількість категорій та підкатегорій та можливість встановлення лімітів.	Можна створювати декілька бюджетів, по часу (місячний, річний), але немає автоматичного розподілу доходів.	Відсутня.	Найбільша кількість різноманітних графіків серед аналогів.	1) Моніторингу інвестицій та відстеження їхнього прогресу. 2) Облік витрат і доходів для малого бізнесу.

Попри різноманітність інтерфейсів та функціоналу, лише два з проаналізованих додатків демонструють наявність механізму планування та розподілу бюджету. В результаті огляду вдалося прослідкувати, на яких методах управління бюджетом вони побудовані. Зокрема, YNAB створений на основі zero-based budgeting – стратегії, що базується на принципі «дай кожній гривні роботу» (англ. give every dollar a job). Кожна гривня має своє призначення: після внесення доходу всі кошти розподіляються по категоріях витрат або заощадженнях, і на балансі не повинно залишатися нічого. Натомість застосунок GoodBudget є класичним прикладом використання методу конвертів, згаданого раніше. У той час інші додатки зосереджені лише на обліку бюджету – відстеженні доходів та витрат.

Попри окремі елементи планування у деяких застосунках, жоден з них не пропонує повноцінних сценаріїв ведення бюджету чи інструментів його оптимізації відповідно до фінансових цілей користувача. Наприклад, не передбачено можливості обрати бажану мету (як-от накопичення певної суми, зменшення витрат у конкретній категорії чи досягнення фінансової подушки), після чого система б підказувала, як краще перерозподілити витрати або змінити звички. Проаналізуємо, чи це можливо реалізувати за допомогою методів лінійного програмування, зокрема симплекс-методу.

Лінійне програмування – математична дисципліна, присвячена теорії і методам розв'язання задач про екстремуми лінійних функцій на множинах, що задаються системами лінійних рівнянь [8]. Симплекс-метод є алгоритмом лінійного програмування, який застосовується для розв'язання задач оптимізації з лінійними обмеженнями. Основна ідея методу полягає в переміщенні по вершинах багатогранника, визначеного обмеженнями задачі, з метою знаходження оптимального

значення цільової функції. Алгоритм працює через ітерації, на кожному з яких вибираються змінні, які можуть покращити значення цільової функції, і змінюються таким чином, щоб задовольняти всі обмеження [9]

Задача лінійного програмування у загальній формі виглядає так: Максимізувати функцію (1), за умов(2):

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \quad (1)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \le b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \le b_2$$
$$\cdots$$
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \le b_m \quad (2)$$

де:

Z – цільова функція, яку потрібно максимізувати або мінімізувати;

$x_1, x_2, \ldots, x_n$ – змінні, які потрібно визначити;

$c_1, c_2, \ldots, c_n$ – коефіцієнти цільової функції.

a_{ij} – коефіцієнти обмежень;

$b_1, b_2, \ldots, b_n$ – обмеження для кожного рядка.

Симплекс-метод дозволяє ефективно знаходити оптимальні значення змінних, що максимізують або мінімізують функцію, забезпечуючи задоволення всіх лінійних обмежень задачі.

Для перевірки можливостей симплекс-методу в контексті фінансового планування була розв'язана задача оптимізації розподілу місячного бюджету. Основна мета задачі – досягнення певної фінансової цілі (заощадження на відпочинок) при збереженні балансу між різними категоріями витрат і обмеженнями бюджету..

Умову задачі сформулюємо так: користувач хоче назбирати 20 тис. грн. на відпочинок, маючи 15 тис. грн. щомісячного доходу та фіксовані витрати на оренду житла та комунальні послуги – 5 тис. грн. Запропонуємо користувачу два варіанти плану бюджету, досягти фінансової мети за 3 або за 6 місяців.

Цільова функція, яка визначає якість життя, є відносним показником і формулюється так (3):

$$Z = -0.3x_1 - 0.2x_2 - 0.1x_3 \quad (3)$$

де:

-0.3, -0.2, -0.1 – коефіцієнти, які представляють відносну важливість кожної категорії витрат для користувача;

x_1, x_2, x_3 – категорії витрат: їжа, розваги, транспорт.

Необхідно мінімізувати зниження якості життя користувача при досягненні фінансової цілі. Тобто, задача полягає у пошуку оптимального балансу між максимізацією заощаджень і мінімізацією негативного впливу на комфорт користувача. Обмеження враховували доступний місячний бюджет, фіксовані витрати, заощадження на ціль та обмеження на інші категорії витрат (4):

$$1500 \le x_1 \le 3000 \qquad 700 \le x_2 \le 2000 \qquad 500 \le x_3 \le 700 \quad (4)$$

Результати розрахунків побачимо на таблиці 3.

Таблиця 3. Результат алгоритму

Категорія	План на 3 місяці	План на 6 місяців
Продукти	2134 грн.	3000 грн.
Оренда	5000 грн.	5000 грн.
Розваги	700 грн.	2000 грн.
Транспорт	500 грн.	700 грн.
Відкладення на ціль	6666 грн.	3333 грн.
Заощадження	0 грн.	967 грн.
Максимізована якість життя	830	1370

Перший план дозволяє користувачу швидше досягнути фінансової мети, однак це обмежує інші категорії витрат, і залишає нульові заощадження. Другий план є більш гнучким: він забезпечує вищий рівень якості життя, дозволяє відкласти частину коштів на заощадження, але для досягнення мети знадобиться більше часу.

Для реалізації використовувався алгоритм, реалізований в Python через модуль scipy.optimize.linprog. Код програми для розв'язання задачі наведений на рисунку 1.

Рис. 1 Програма для вирішення задачі

Для реалізації задачі оптимізації було використано саме мову програмування Python, оскільки вона має широкий набір спеціалізованих бібліотек для математичного моделювання та обчислень. Зокрема, бібліотека scipy.optimize надає зручний інструмент для розв'язання задач лінійного програмування – функцію linprog(), яка дозволяє застосовувати симплекс-метод або інші чисельні алгоритми.

Опис параметрів функції linprog:

– c – коефіцієнти цільової функції (пріоритети витрат). Знак мінус ставиться, бо linprog мінімізує, а ми хочемо максимізувати якість життя.

– A_ub – матриця обмежень. Використовується одиниця, бо враховується, що всі чотири категорії витрат сумуються та не повинні перевищувати доступний бюджет.

– b_ub – вектор обмежень. Це доступний бюджет після відкладання на ціль.

– bounds – межі для кожної змінної. Визначають мінімальні та максимальні витрати на кожну категорію.

– method – метод розв'язання (simplex).

Оскільки модель реалізовано мовою програмування Python, виникає потреба довести можливість її використання в мобільному додатку, зокрема – на платформі Android. Для цього потрібно забезпечити запуск Python-коду безпосередньо в середовищі Android Studio. З цією метою було використано плагін Chaquopy, який дозволяє інтегрувати Python-скрипти в Android-застосунок.

Налаштування середовища та імплементація Chaquopy здійснювалися відповідно до офіційної технічної документації. На рисунку 2 представлено фрагмент коду MainActivity, який демонструє запуск Python-коду в Android Studio.

Рис. 2. Запуск python-коду в Android Studio

Також до проєкту було успішно імпортовано бібліотеку scipy, яка необхідна для роботи функції linprog(). Після коректного налаштування всі компоненти взаємодіють стабільно, а Python-алгоритм виконується в межах Android-додатку без збоїв.

Висновки та перспектива подальших досліджень. У статті проведено аналіз функціональних можливостей п'яти мобільних застосунків для ведення особистого бюджету. З'ясовано, що лише окремі з них реалізують стратегії планування, такі як zero-based budgeting чи метод конвертів, тоді як більшість обмежуються лише обліком витрат. Розглянута теорія ментальної гнучкості Талера доводить необхідність інтеграції стратегій планування в процес управління бюджетом, оскільки люди вже використовують їх на рівні мислення. Жоден із розглянутих застосунків не містить вбудованих інструментів для автоматизованого розподілу бюджету з урахуванням фінансових цілей користувача.

У якості демонстрації можливостей математичної оптимізації було реалізовано просту модель на основі симплекс-методу, що дозволяє формувати бюджет із заданими обмеженнями. Вона була успішно інтегрована в Android-додаток за допомогою Chaquipy.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на вдосконаленні цієї моделі: зокрема, на врахуванні змін доходу, сезонних витрат, історичних даних користувача, його індивідуальних фінансових звичок. Можливо також дослідити побудову адаптивних сценаріїв – наприклад, коли система пропонує користувачу декілька планів бюджету в залежності від обраної мети. Завдяки такому підходу користувачі зможуть легше керувати своїм бюджетом – додаток сам підкаже, як краще розподілити гроші.

Список бібліографічного опису

1. Personal Finance Apps Market Size, Share, Analysis, Trends, Growth, Forecasts 2032. URL: https://... (дата звернення: 01.04.2025).
2. Comparative Study of Mobile Payment Platforms Key Insights. URL: https://... (дата звернення: 01.04.2025).
3. Національний банк України. Фінансова грамотність, фінансова інклюзія та фінансовий добробут в Україні. URL: https://... (дата звернення: 03.04.2025).
4. Арнаутова О. Застосування методів лінійного програмування на комп'ютері для планування обмеженого бюджетного видатків у сфері фінансового забезпечення вибір. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки.* – 2023. – № 2(55). – С. 43–47.
5. Okulov S. K. Application of Optimization Principle in Landmark University Project Selection under Multi-Period Capital Rationing Using Linear and Integer Programming. *Open Journal of Optimization.* 2019. Vol. 08, no. 03. P. 73–82.
6. Akmal M., Siu C. Evaluating Budgeting Apps: Limited Support for Budgeting Compared to Tracking. *9th International ICST Human-Computer Interaction Conference.* 2023.
7. Thaler R. H. Mental accounting matters. *Journal of Behavioral Decision Making.* 1999. Vol. 12, no. 3. P. 183–206.
8. Іванко І. Ю. Математичне програмування : навч. посіб. для студентів екон. спец. вищ. навч. закл. Київ : Центр учб. літ., 2007. 232 с.
9. Taha T. H. A. Operations Research: An Introduction, 8/e. Pearson Education India, 2008.

References

1. Personal Finance Apps Market Size, Share, Analysis, Trends, Growth, Forecasts 2032. URL: https://... (accessed: 01.04.2025).
2. Comparative Study of Mobile Payment Platforms Key Insights. URL: https://... (accessed: 01.04.2025).

3. National Bank of Ukraine. Financial Literacy, Financial Inclusion, and Financial Well-being in Ukraine. URL: https://bank.gov.ua/en (accessed: 03.04.2025).
4. Antonenko O. Application linear programming and optimization methods to improve the effectiveness of budget expenditures in the field financial support the military troops. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv: Military-Special Sciences*. 2023. № 3 (55). С. 41–47.
5. Olaleye N. K. Application of Optimization Principle in Landmark University Project Selection under Multi-Period Capital Rationing Using Linear and Integer Programming. *Open Journal of Optimization*. 2019. Vol. 08, no. 03. P. 75–82.
6. Alonso M., Sas C. Evaluating Budgeting Apps: Limited Support for Budgeting Compared to Tracking. *36th International BCS Human-Computer Interaction Conference*. 2023.
7. Thaler R. H. Mental accounting matters. *Journal of Behavioral Decision Making*. 1999. Vol. 12, no. 3. P. 183–206.
8. Ivilenko, I. Yu. Mathematical Programming: A Textbook for University Students. Kyiv: Center for Educational Literature, 2007. 232 p.
9. Taha T. H. A. Operations Research: An Introduction. 8/e. Pearson Education India, 2008.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-04
УДК: 004.415;004.6
Андрущак Ігор Євгенович, д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0002-8751-4420
Шмаровоз Станіслав Васильович, магістр
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМ У КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖАХ: ТИПОВІ ПРОБЛЕМИ І РІШЕННЯ

Андрущак І. Є., Шмаровоз С. В. Забезпечення надійності моніторингових систем у корпоративних мережах: типові проблеми і рішення. У статті розглядаються актуальні аспекти забезпечення надійності систем моніторингу у корпоративних комп'ютерних мережах. З урахуванням зростаючої складності IT-інфраструктур, надійність моніторингу набуває критичного значення для підтримання безперервності сервісів, своєчасного реагування на інциденти та запобігання фінансовим втратам. Проведено детальний аналіз типових проблем, таких як єдині точки відмови (SPOF), перевантаження системи, хибні спрацювання тригерів, втрати даних та ненадійні канали сповіщення. Наведено статистику з авторитетних джерел і приклади реальних інцидентів, що ілюструють наслідки неефективного моніторингу в умовах зростаючого навантаження та складності. Окрема увага приділена технічним і архітектурним заходам підвищення стійкості: розподіленим системам, кластеризації серверів, реплікації баз даних, використанню багатоканального інформаційного механізму та автоматичної реакції на інциденти. Обґрунтовано доцільність впровадження інтелектуальної фільтрації подій, кореляції сигналів тривоги та регулярного тестування працездатності компонентів. Запропоновано комплексну архітектуру надійної моніторингової системи, що включає AI-алгоритми, кешування, резервування та адаптивну маршрутизацію повідомлень. Визначено напрями подальших досліджень, зокрема динамічне налаштування порогів спрацювання за допомогою самонавчальних алгоритмів, вивчення впливу людського фактора та інтеграції з інструментами кібербезпеки. Представлені рішення дозволяють значно зменшити ризики критичних збоїв, оптимізувати реагування, підвищити ефективність моніторингу та створити передумови для стабільного розвитку інформаційних систем.
Ключові слова: моніторинг мережі, fault-tolerance, надійність, корпоративна мережа, сповіщення, високодоступність, безперервність сервісу, інцидент-менеджмент, автоматизація, машинне навчання, кіберстійкість, аналітика подій.

Andrushchak I., Shmarovoz S. Ensuring the Reliability of Monitoring Systems in Corporate Networks: Typical Problems and Solutions. The article explores current aspects of ensuring the reliability of monitoring systems in corporate computer networks. Given the growing complexity of IT infrastructures, monitoring reliability is critically important for maintaining service continuity, ensuring timely incident response, and preventing financial losses. A detailed analysis of common problems is provided, including single points of failure (SPOF), system overload, false trigger activations, data loss, and unreliable alerting channels. Statistical data from authoritative sources and real-world examples are cited to illustrate the consequences of inadequate monitoring under high load and complexity. Particular attention is given to technical and architectural measures for increasing system resilience: distributed architectures, server clustering, database replication, multichannel notification mechanisms, and automated incident response. The paper substantiates the implementation of intelligent event filtering, alarm correlation, and regular system health testing. A comprehensive architecture is proposed that incorporates AI algorithms, caching, failover, and adaptive message routing. Future research directions are outlined, including dynamic threshold adjustment using self-learning algorithms, studying the impact of human factors, and integration with cybersecurity tools. The proposed solutions significantly reduce the risk of critical failures, optimize response processes, increase monitoring efficiency, and establish a foundation for the stable development of corporate information systems.
Keywords: network monitoring, fault tolerance, reliability, corporate network, alerting, high availability, service continuity, incident management, automation, machine learning, cyber resilience, event analytics.

Постановка проблеми. У складних корпоративних мережах надійний моніторинг є критично важливим для запобігання збоїв і забезпечення безперервності роботи сервісів. Згідно з дослідженнями Gartner, понад 60% простоїв сервісів у корпоративних IT-системах були спричинені недоліками моніторингових рішень або їх несвоєчасною реакцією на інциденти. Централізовані або слабко масштабовані системи часто стають вразливими до збоїв, що призводить до втрати контролю над інфраструктурою або несвоєчасного реагування. Проблема ускладнюється швидким зростанням кількості пристроїв, трафіку та взаємозв'язків у межах сучасних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових працях та технічних звітах описано переваги використання відмовостійких рішень у побудові систем моніторингу (Zabbix, Nagios, Prometheus). У роботах [1–2] розглянуто підходи до забезпечення fault-tolerance на рівні сервера та мережевих агентів. У публікаціях Zabbix [4] описано типову архітектуру з реплікацією бази даних, горизонтальним масштабуванням та балансуванням навантаження. Проте більшість практичних досліджень зосереджені на налаштуванні окремих інструментів, тоді як питання комплексної надійності часто залишаються поза увагою.

Мета дослідження – показати основні проблеми надійності моніторингових систем у корпоративних мережах і запропонувати рішення для їх усунення.

Виклад основного матеріалу.

1. Типові проблеми надійності моніторингових систем

1.1 Єдина точка відмови. Проблема Single Point of Failure (SPOF) виникає у випадках, коли відмова одного критичного компонента системи призводить до повної недоступності сервісу моніторингу. Нижче зображено приклад SPOF, де точкою відмови є роутер.

Рис. 1 – Приклад SPOF[5]

Найбільш поширеним SPOF є централізований сервер без резервування, який виконує функції збору, обробки та зберігання метрик. У разі його збоїв – втрачається не лише доступ до історичних даних, а й можливість миттєвого виявлення нових інцидентів у мережі.

Типові прояви:

- зникнення всіх активних оповіщень;
- повний дашборди та втрата оновлення даних у реальному часі;
- неможливість аналітичного аналізу ситуації після відновлення.

Згідно з аналітичним звітом Red Hat [8] за 2023 рік, 30% середніх і великих компаній зазнали принаймні одного критичного інциденту через відсутність відмовостійкості моніторингового компонента. В окремих випадках час простою сягав кількох годин, що завдавало значних фінансових і репутаційних збитків.

Причини появи SPOF:

- централізована база даних без реплікації або кластеризації;
- відсутність резервного сервера або агента;
- один канал доставки сповіщень (наприклад, лише email);
- відсутність балансування навантаження та автоматичного перемикання на резерв.

1.2 Надмірне навантаження: одна з найпоширеніших технічних проблем у системах моніторингу, особливо у великих корпоративних середовищах із великою кількістю вузлів. Перевантаження виникає тоді, коли обсяг запитів до системи перевищує її обчислювальні або мережеві можливості. Наприклад, у системі з 10 000 пристроїв і частотою опитування 30 секунд, упродовж хвилини генерується понад 300 000 запитів. Якщо система не оптимізована, це призводить до:

- значного уповільнення збору та обробки даних;
- затримок у спрацюванні тригерів та генерації сповіщень;
- пропуску критичних подій через перевантаження черги обробки;
- повного падіння сервісу у пікові періоди навантаження.

Надмірне навантаження часто є наслідком:

- відсутності горизонтального масштабування;
- недостатньої оптимізації запитів або агрегації даних;
- погано налаштованих метрик або надмірної кількості тригерів.

використання повільної СУБД або перевантажених дисків для зберігання логів.

За оцінками Gartner, 37% відмов у системах моніторингу в середніх і великих компаніях у 2022–2023 роках були спричинені саме надмірним навантаженням на моніторингові сервери.

1.3 Хибні спрацювання: Найпоширеніша причина недовіри до системи – **завелика кількість некоректних оповіщень**. За даними Splunk [7], **до 40% всіх сповіщень** виявляються хибними

Причини:

логано налаштовані порогові значення;

неврахован шаблони «нічного» трафіку чи планових оновлень;

– події з короткочасними відхиленнями (сплески навантаження).

Наслідки:

– IT-фахівці ігнорують сповіщення («alert fatigue»);

– затримка в реагуванні на реальні інциденти;

– псевдоінциденти можуть запускати ланцюгову автоматизацію.

1.4 Втрати даних: Це критична проблема для систем, які повинні зберігати **повну історію подій і метрик**. Типові причини:

відмова бази даних (MySQL/PostgreSQL) без реплікації;

розрив з'єднання між агентом і сервером;

заповнення диска логами або бекапами.

Типові наслідки:

– втрата аналітичної цілісності (неповні графіки);

– неможливість провести ретроспективне розслідування інциденту;

– втрата довіри до системи як до джерела істини.

1.5 Ненадійне оповіщення: Система може успішно **виявити інцидент**, але **не повідомити про нього відповідальних осіб**, якщо нотифікація працює лише через один канал (наприклад, email). За даними SolarWinds [6], **27% критичних інцидентів залишились непоміченими** саме через збій у системі сповіщення.

застосування лише SMTP без fallback-каналу;

відсутність журналу надсилання;

обмеження API Telegram/Slack, що спричиняє rate-limit errors.

2. Шляхи підвищення надійності

Надійність системи моніторингу визначається її здатністю продовжувати функціонувати навіть за умов часткових збоїв, втрати зв'язку або перевантаження. Підвищення надійності потребує поєднання технічних, архітектурних та організаційних заходів. Нижче наведено ключові напрямки з розгорнутим поясненням.

2.1 Розподілена архітектура: передбачає розміщення компонентів системи моніторингу на кількох вузлах, які взаємодіють між собою. Це дозволяє зменшити навантаження на кожен окремий компонент і усунути залежність від одного центрального вузла. Наприклад, при розподіленні функцій збору даних, аналітики і оповіщення на різні сервери – кожен з них можна оновлювати чи обслуговувати окремо без зупинки всієї системи. Приклад розподіленої архітектури наведено нижче, на рисунку 2.

Рис 2 – Приклад розподіленої архітектури

2.2 Резервування компонентів: реалізація активного або пасивного дублювання критичних вузлів. Це може включати:

– використання кластерних рішень для серверів моніторингу (Zabbix HA, Prometheus Federation);

– реплікацію баз даних (наприклад, PostgreSQL з hot standby);

– резервні інтерфейси для надсилання сповіщень (SMS, Telegram, Slack). У разі збою основного компонента резервна система автоматично або напівавтоматично підхоплює навантаження.

2.3 Інтелектуальна фільтрація подій: дозволяє зменшити кількість хибнопозитивних сповіщень, які викликають перевантаження персоналу або втрату довіри до системи. Серед технік фільтрації:

– кореляція подій на основі прецедентів (наприклад, тривога виникає лише при комбінації кількох факторів);

– застосування алгоритмів машинного навчання (Isolation Forest, DBSCAN) для виявлення аномалій у поведінці мережі;

– розумне групування сповіщень за джерелом або типом інциденту.

2.4 Регулярний аудит та тестування: система моніторингу має сама проходити перевірку на працездатність. Це може включати:

– симуляцію подій або збоїв (synthetic events);

– аудит конфігурацій тригерів і каналів зв'язку;

– перевірку логів на наявність недоставлених повідомлень. Регулярне тестування дозволяє виявити вразливі місця, які могли б залишитися непоміченими до критичного моменту.

2.5 Автоматизація реакцій: у сучасних мережах важливо не лише виявляти проблему, а й реагувати на неї автоматично. Наприклад:

– запуск скрипта перезапуску служби у разі падіння;

– блокування IP-адреси при виявленні аномальної активності;

– автоматичне перемикання маршруту на резервний канал;

– інтеграція з системами автоматизації (Ansible, SaltStack, Puppet). Це суттєво скорочує час з моменту інциденту та знімає навантаження на IT-персонал.

Реалізація навіть частини наведених заходів дозволяє суттєво підвищити стійкість системи моніторингу, скоротити час простоїв і підвищити рівень довіри до її сповіщень.

3. Комплексна архітектура надійної системи моніторингу зображена на рисунку 3.1 та має містити:

– агенти на хостах з можливістю кешування локальної інформації при втраті зв'язку;

– центральний сервер збору подій з реплікованою БД;

– резервний сервер, автоматично активований при відмові основного;

– модуль фільтрації на основі правил і AI;

– багатоканальний модуль нотифікацій (email, Telegram, SMS, Slack API).

– панель адміністратора з можливістю запуску скриптів реагування.

Рис. 3 – Комплексна архітектура надійної системи моніторингу

Висновки та перспектива подальших досліджень. Надійність моніторингових систем є ключовим фактором стабільної роботи сучасної IT-інфраструктури. У статті проаналізовано найпоширеніші загрози для таких систем, серед яких – єдина точка відмови, надмірне навантаження, хибні спрацювання, втрати даних та несвоєчасне оповіщення. Кожна з цих проблем здатна призвести до серйозних порушень безперервності бізнес-процесів, значних фінансових збитків або втрати контролю над критично важливими ресурсами.

Запропоновані техніки та архітектурні рішення – зокрема впровадження розподіленої інфраструктури, резервування компонентів, застосування інтелектуальних алгоритмів фільтрації подій, регулярне тестування та автоматизована реакція на інциденти – дозволяють суттєво підвищити стійкість моніторингових систем до збоїв.

Особливу увагу в майбутніх дослідженнях слід приділити використанню самонавчальних систем для динамічного налаштування порогів, а також вивченню впливу людського чинника на ефективність реагування. Крім того, перспективним є розвиток мультиканальних систем оповіщення з пріоритетним маршрутизуванням гнівок та аналізом хибного зв'язку.

Комплексний підхід до проектування і розвитку систем моніторингу дозволяє не лише уникати інцидентів, а й створює основу для довготривалої надійної та безпечної експлуатації корпоративної IT-інфраструктури.

Список бібліографічного опису

1. Barabanov A., Chen M., Gupta R. High Availability in Network Monitoring Systems. Journal of Network and Systems Management. 2020. Vol. 28. No. 3. P. 467–484.
2. Oliinyk O. O. Надійність інформаційних систем: проблеми і підходи. Вісник ПІТУ «КПІ». 2021. № 4. С. 45–52.
3. Nagios Core Documentation. URL: https://www.nagios.org/documentation/ (дата звернення: 02.03.2025).
4. Zabbix Architecture Overview. URL: https://www.zabbix.com/documentation/current/en/manual/concepts/overview (дата звернення: 02.03.2025).
5. Single point of failure // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Single_point_of_failure (дата звернення: 11.03.2025).
6. SolarWinds IT Trends Report 2024 URL: https://www.solarwinds.com/ (дата звернення: 15.05.2025).
7. Splunk. Alert Noise Reduction Study 2023. URL: https://www.splunk.com/ (дата звернення: 22.04.2025).
8. Red Hat. State of Enterprise Infrastructure 2023. URL: https://www.redhat.com/ (дата звернення: 03.05.2025).

References

1. Barabanov A., Chen M., Gupta R. High Availability in Network Monitoring Systems. *Journal of Network and Systems Management*. 2020. Vol. 28. No. 3. P. 467–484.
2. Oliinyk O. O. Reliability of Information Systems: Problems and Approaches. *Bulletin of NTUU "KPI"*. 2021. No. 4. P. 45–52.
3. Nagios Core Documentation. URL: https://www.nagios.org/documentation/ (accessed: 02.03.2025).
4. Zabbix Architecture Overview. URL: https://www.zabbix.com/documentation/current/en/manual/concepts/overview (accessed: 02.03.2025).
5. Single point of failure. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Single_point_of_failure (accessed: 11.03.2025).
6. SolarWinds. IT Trends Report 2024. URL: https://www.solarwinds.com/ (accessed: 15.05.2025).

7. Splunk. Alert Noise Reduction Study, 2023. URL: https://www.splunk.com/ (accessed: 22.04.2025).
8. Red Hat. State of Enterprise Infrastructure 2023. URL: https://www.redhat.com/ (accessed: 03.05.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-05
УДК 004.72
Багнюк Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-7120-5455
Бортнюк Катерина Яківна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-5282-098X
Федорусь Юрій Володимирович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-6700-7712
Оніпович Володимир Олександрович, студент
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МІГРАЦІЇ СЕРВЕРНИХ СИСТЕМ ТА ПОБУДОВИ WI-FI МЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУЧАСНОЇ IT-ІНФРАСТРУКТУРИ ПІДПРИЄМСТВА

Багнюк Н. В., Бортнюк К. Я., Федорусь Ю. В., Оніпович В. О. Технічна реалізація процесів міграції серверних систем та побудови Wi-Fi мережі для забезпечення сучасної IT-інфраструктури підприємства. У статті описано процес перенесення інформаційного середовища серверної інфраструктури на нову апаратно-програмну платформу з одночасним розгортанням бездротової мережі Wi-Fi у межах підприємства. Особливу увагу приділено технічним аспектам міграції даних, зокрема ускладненням, що виникають під час роботи з RAID-масивами та віртуальними машинами, які використовуються для забезпечення надійності, масштабованості та гнучкості сервісів. Описано низку типових проблем, пов'язаних із цілісністю даних, збереженням конфігурацій, сумісністю обладнання та забезпеченням безперервного функціонування під час перенесення сервісів. Запропоновано ефективні підходи до оптимізації процесу перенесення, включаючи попереднє тестування середовища, резервне копіювання, використання гібридної інфраструктури на перехідному етапі. У межах технічної реалізації побудовано сервер на основі серверної системи Windows Server 2022, що забезпечує централізоване управління користувачами та файловими службами. Для організації бездротового доступу до локальної мережі встановлено маршрутизатор MikroTik hAP ac² разом із точками доступу UniFi виробництва Ubiquiti, що дозволило забезпечити стабільне покриття, гнучке управління клієнтськими підключеннями та високий рівень безпеки передачі даних.

Ключові слова: серверна інфраструктура, міграція даних, віртуалізація, резервне копіювання, RAID, Wi-Fi мережа.

Bahniuk N., Bortnyk K., Fedorus Y., Onipovych V. Technical implementation of server system migration processes and Wi-Fi network construction to ensure a modern enterprise IT infrastructure. *The article describes the process of transferring the information environment of the server infrastructure to a new hardware and software platform with the simultaneous deployment of a wireless Wi-Fi network within the enterprise. Particular attention is paid to the technical aspects of data migration, in particular, the complications that arise when working with RAID arrays and virtual machines, which are used to ensure reliability, scalability and isolation of services. An analysis of typical problems related to data integrity, configuration preservation, equipment compatibility and ensuring continuous operation during service migration is presented. Effective approaches to optimizing the migration process are proposed, including preliminary testing of the environment, backup, and the use of hybrid infrastructure at the transition stage. As a technical implementation, a server based on the Windows Server 2022 operating system was built, which provides centralized management of network and file services. To organize wireless access to the local network, a MikroTik hAP ac² router was used together with UniFi access points manufactured by Ubiquiti, which ensured stable coverage, flexible management of client connections, and a high level of protection of transmitted data.*

Keywords: server infrastructure, data migration, virtualization, backup, RAID, Wi-Fi network.

Постановка наукової проблеми. Сучасні підприємства активно використовують сервери технології для обробки даних, зберігання інформації та забезпечення стабільного функціонування мережі. На сьогодні, сервери інфраструктури є двох типів, а саме хмарні сервери та фізичні. Міграція серверної інфраструктури є важливим процесом, який вимагає врахування таких аспектів, як безперервність роботи систем, сумісність обладнання та безпека даних. Додатково важливим є налаштування Wi-Fi мережі для забезпечення ефективного бездротового зв'язку. Важливим напрямом дослідження є створення нової серверної та мережевої інфраструктури, а також складнощі, які виникають під час застосування RAID-масиву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері міграції серверів зосереджені на автоматизації процесу перенесення даних та мінімізації простоїв під час переходу на нові апаратні та програмні платформи. Важливим аспектом є використання контейнеризації (Docker, Kubernetes) для підвищення гнучкості та масштабованості інфраструктури.

Щодо RAID-масивів, актуальними [1] є дослідження ефективності використання NVMe-дисків у RAID-масивах, які дозволяють значно підвищити швидкість читання та запису даних у порівнянні з традиційними SSD-накопичувачами. Також вивчаються методи програмного RAID (mdadm у Linux, Storage Spaces у Windows) як альтернатива апаратним контролерам.

У статті [2] в сфері Wi-Fi технологій останні розробки спрямовані на впровадження стандарту Wi-Fi 7 (802.11be), що забезпечує кращу продуктивність і зниження затримок. Дослідження також поглиблюють

використання технологій MU-MIMO і OFDMA для підвищення ефективності передачі даних у багатокористувацькому середовищі.

Для інтеграції серверних платформ із сучасними мережевими технологіями активно досліджуються SDN (Software-Defined Networking) і Zero Trust Security, що дозволяє покращити контроль трафіку та підвищити рівень безпеки у корпоративних мережах.

В даному випадку використовується локальний сервер для організації та відмова від сучасних тенденцій у зв'язку з малим обсягом інформації для зменшення фінансових витрат за рахунок сумішення роботи системного адміністратора та фахівця з кібербезпеки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри розвиток серверних технологій та бездротових мереж [3], процес міграції інфраструктури залишається складним. Зокрема, відсутнє питання сумісності обладнання, безперервної роботи сервісів, швидкої передачі даних у мережах та ефективності використання віртуалізації.

Мета дослідження: основною метою дослідження є аналіз та розробка ефективних методів міграції серверної інфраструктури підприємства, а також розгортання мережі з використанням сучасного обладнання, такого як MikroTik та UniFi Ubiquiti.

Завдання дослідження. Налаштування серверної [4] та мережевої інфраструктури, тестування та налаштування програмної частини. Реалізація завдань дозволить розгортати нову мережу, виконувати міграцію та налаштування інфраструктури.

Основна частина дослідження. Перед міграцією виконано аудит системи, включаючи аналіз апаратної конфігурації, структури RAID, використання віртуалізації та резервне копіювання важливих даних.

Під час аудиту проведено моніторинг продуктивності існуючого серверу, аналіз навантаження на процесор, оперативну пам'ять та дискову підсистему. Визначено, що попередня конфігурація RAID не забезпечує певного рівня відмовостійкості, тому рекомендовано відмовитись від RAID. Також проведено аналіз використання віртуальних машин, де виявлено перевантаження деяких екземплярів та перехід на локальну інфраструктуру для невеликого підприємства.

Програмним забезпеченням серверної частини обрано платформу Windows Server 2022. Апаратною складовою є сервер на базі процесора Intel Core I5-12600KF, 64 гігабайта DDR5 та 3 терабайти вбудованої пам'яті.

Для запуску сервера на даній платформі встановлено дистрибутив операційної системи Windows Server 2022 на базі процесорів з архітектурою ARM.

Міграція серверу складалась з таких етапів, як:

– створення повної копії інформації та баз користувачів;

– встановлення Windows Server 2022;

– налаштування серверу, встановлення програм та відновлення даних;

– тестування роботи системи на відмовостійкість та налаштування плану резервних копій.

Під час міграції виникли труднощі з сумісністю драйверів для нового обладнання, що потребувало ручної інсталяції та оновлення мікропрограми. Також виявлено, що процес відновлення з резервної копії зайняв більше часу через великий простою здатність мережевого середовища. Тому прийнято рішення використовувати виділений NAS-сервер для прискорення відновлення резервного копіювання.

Рис. 1. Процес відновлення резервної копії

Наступний етап – розгортання мережі та налаштування віддаленого доступу. Для покращення бездротового зв'язку налаштовано [5] маршрутизатор MikroTik hap ac2 та встановлено точки доступу UniFi Ubiquiti [6]. Основні етапи налаштування включали:

– встановлення контролера UniFi;

– конфігурація VLAN для сегментації трафіку;

– тестування покриття та усунення слабких зон.

Результати тестування Wi-Fi мережі показали, що в деяких зонах сигнал був слабким, і тому потрібно коригувати розташування точок доступу UniFi Ubiquiti. Запроваджено технологію Band Steering для автоматичного перемикання користувачів між 2.4 ГГц та 5 ГГц з метою забезпечення оптимальної якості зв'язку. Також налаштовано гостьову мережу з обмеженим доступом до внутрішніх ресурсів.

Після тестування та встановлення необхідного програмного забезпечення, створено та налаштовано профілі для доступу до сервера з локальної мережі. Перший етап – створення профілів, другий – підключення користувачів через віддалений робочий стіл (рис. 2-3).

Рис. 2. Створення профілів користувачів на сервері

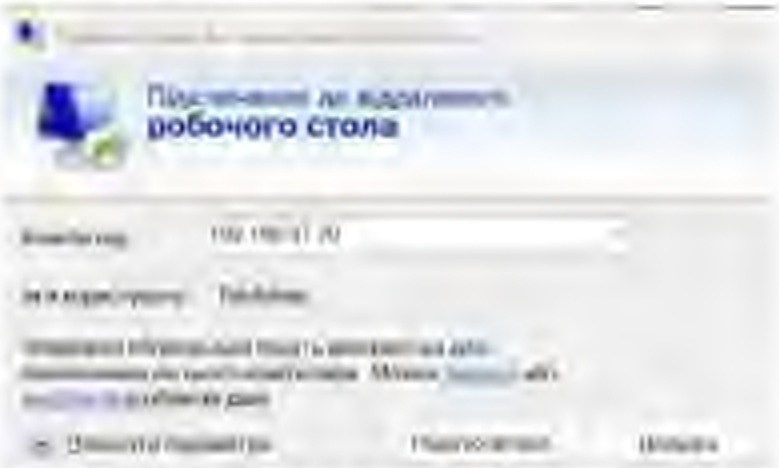


Рис. 3. *Другий етап* – підключення користувачів з локальної мережі

Резервне копіювання є щоденним та створюється на виділений диск в середовищі Windows. Також створено бекап-сервер на дистрибутиві Linux для зберігання копій.

Для віддаленого доступу налаштовано в маршрутизаторі протокол VPN, а саме PPTP. Детальне налаштування протоколу для віддаленого доступу подано на рисунках 2-5.

Рис. 4. Створення PPTP servera

Другим етапом після створення сервера, є створення основного профілю протоколу та прописування пулу IP-адрес, в межах якого будуть підключатись користувачі.

Рис. 5. Створення профілю та налаштування пулу адрес

Третім етапом є створення профілю користувачів для віддаленого доступу через віддалений робочий стіл, а саме створення профілю, пароля та внесення їх до бази.

Рис. 6. Створення профілів для віддаленого доступу

Останній етап – підключення користувачів до серверної інфраструктури, а саме, налаштування віддаленого доступу через VPN та створення підключення до віддаленого робочого столу.

Рис. 7. Перевірка підключення до сервера

Результатом міграції серверної інфраструктури та розгортанням нової мережі є повністю нова та відмовостійка інфраструктура для підприємства, створена за наданими вимогами. Дані методи допомагають для міграції інфраструктури. На рисунку 8 показано основний і резервний сервер для копіювання та мережеву шафу підприємства.

Рис. 8. Серверна підприємства

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Процес міграції серверної інфраструктури потребує ретельного планування, тестування та резервного копіювання даних, використання Windows Server 2022, дистрибутиву Linux та надійного обладнання. Розгортання Wi-Fi мережі з використанням MikroTik та UniFi забезпечує стабільне бездротове підключення. Дані методи можуть бути використані при модернізації IT-інфраструктури підприємства.

Результати тестування Wi-Fi мережі показали, що в деяких зонах сигнал був слабким, що потребувало коригування розташування точок доступу UniFi Ubiquiti. Запроваджено технологію Band Steering для автоматичного перемикання користувачів між 2.4 ГГц та 5 ГГц для забезпечення оптимальної якості зв'язку. Також налаштовано гостьову мережу з обмеженим доступом до внутрішніх ресурсів. Окрім основних висновків, було визначено, що використання централізованої системи моніторингу для серверної інфраструктури та бездротових мереж значно підвищує ефективність керування. Рекомендовано впровадження інструментів аналізу журналів подій та активного сповіщення про потенційні проблеми.

Список бібліографічного опису:

1. Що таке Raid, для чого його використовують та які бувають Рейд масиви?. *Інтернет магазин Alfa Server. Робочі станції, комп'ютери, сервери. Найкращі ціни.* URL: https://surl.cc/rgrpfu (дата звернення: 12.03.2025).
2. Dspace : ЕLAKPI. *Репозитарій КПІ ім. Ігоря Сікорського.* URL: https://surl.li/wvboqm (дата звернення: 25.03.2025).
3. Library | library portal of national academy of sciences of ukraine. URL: https://irbis-nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 02.04.2025).
4. Microsoft Windows Server 2022. Офіційна документація. URL: https://surl.li/ocyvwe (дата звернення: 13.04.2025).
5. MikroTik Documentation. URL: https://wiki.mikrotik.com/ (дата звернення: 15.04.2025).
6. Ubiquiti UniFi – офіційний сайт. URL: https://surl.cc/odifhj (дата звернення: 23.04.2025).

References:

1. What is Raid, what is it used for and what are the types of Raid arrays? Alfa Server online store. Workstations, computers, servers. Best prices. URL: https://surl.cc/rgrpfu (дата звернення: 12.03.2025).
2. Dspace : ЕLAKPI. Репозитарій КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: https://surl.li/wvboqm (дата звернення: 25.03.2025).
3. Library | library portal of national academy of sciences of ukraine. URL: https://irbis-nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 02.04.2025).
4. Microsoft Windows Server 2022. Official documentation URL: https://surl.li/ocyvwe (дата звернення: 13.04.2025).
5. MikroTik Documentation. URL: https://wiki.mikrotik.com/ (дата звернення: 15.04.2025).
6. Ubiquiti UniFi – official website. URL: https://surl.cc/odifhj (дата звернення: 23.04.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-06
УДК 004.73:621.396.946
Баєв Віктор Олексійович, магістр
Пузирьов Сергій Володимирович, к. ф.-м. н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-0520-1496
Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

МОНІТОРИНГ ЛОКАЦІЇ КЛІЄНТІВ МЕРЕЖІ LORAWAN З ВИКОРИСТАННЯМ СЕНСОРНИХ IOT-ПРИСТРОЇВ

Баєв В. О., Пузирьов С. В. Моніторинг локації клієнтів мережі LoRaWAN з використанням сенсорних IoT-пристроїв. У статті розглянуто питання створення системи моніторингу локації клієнтів з використанням сенсорних IoT-пристроїв на базі бездротової технології LoRaWAN. Запропоноване рішення орієнтоване на застосування в умовах обмеженого енергоспоживання, відсутності стільникового покриття та необхідності забезпечення безперервного відстеження переміщень. Система складається з клієнтського пристрою, побудованого на мікроконтролері ESP32 з GPS-модулем NEO-6M і LoRa-модулем SX1278, який передає дані про координати, швидкість руху та тривалість зупинок. Операторський блок приймає повідомлення через мережу LoRaWAN та відображає інформацію на моніторі або LCD-дисплеї у режимі реального часу. Кількість операторських модулів не обмежується. Програмне забезпечення реалізоване в середовищі Arduino IDE із застосуванням бібліотек TinyGPSPlus, LoRa та LiquidCrystal_I2C. Визначено стандартний формат передавання даних, що дозволяє масштабувати систему. Проведено порівняльний аналіз LoRaWAN з іншими бездротовими технологіями, зокрема *ZigBee* та GSM, де LoRaWAN продемонструвала кращі показники енергоефективності, дальності та стабільності зв'язку. Отримане рішення є придатним для використання у сферах туризму, медицини, охорони праці, спорту та транспорту. Воно підвищує безпеку, дозволяє контролювати пересування груп осіб і забезпечує оперативне реагування в надзвичайних ситуаціях, сприяючи впровадженню інтелектуального моніторингу. Окрім цього, представлений прототип системи моніторингу дозволяє масштабувати збір параметрів клієнтів виходячи з конкретних цілей її застосування. Також операторський блок може бути масштабований до виведення інформації на інші носії (наприклад, OLED-дисплей) та автоматизації певних процесів прийняття рішень.
Ключові слова: бездротова мережа, моніторинг, IoT-пристрої, обмежене енергозабезпечення, логістика маршрутів, LoRaWAN, трекінг пацієнтів, туризм, малоенергоспоживаючі сенсори.

Baiev V., Puzyrov S. Monitoring the location of LoRaWAN network clients using sensor IoT devices. The article presents the design of a location monitoring system for clients using sensor-based IoT devices built on LoRaWAN wireless technology. The proposed solution is intended for use in environments with limited power supply, no cellular coverage, and a need for continuous movement tracking. The system consists of a client device based on an ESP32 microcontroller equipped with a NEO-6M GPS module and an SX1278 LoRa transceiver. It transmits data including coordinates, movement speed, and rest duration. The operator module receives messages via the LoRaWAN network and displays real-time information on a LCD display. The number of operator modules is not limited. The software is developed in the *Arduino IDE*, using the TinyGPSPlus, LoRa, and LiquidCrystal_I2C libraries. There is defined data format for system scalability. A comparative analysis with *ZigBee* and GSM technologies shows LoRaWAN's superior energy efficiency, coverage range, and communication stability. The solution is suitable for use in tourism, healthcare, occupational safety, sports, and transport. It improves group safety, supports real-time tracking, and enables rapid emergency response, contributing to intelligent monitoring systems. The given prototype allows scalable client data acquisition depending on the use case. The operator unit can also be extended to output data to other displays (e.g., OLED) or automate certain decision-making processes.
Keywords: wireless network, monitoring, IoT devices, limited power supply, route logistics, LoRaWAN, patient tracking, tourism, low-power sensors.

Постановка наукової проблеми. Технології моніторингу місцезнаходження (локації) людей на основі бездротових мереж все ширше впроваджуються у різні види діяльності. Такий підхід дозволяє реалізовувати ефективні системи логістики, контролю та управління рухомих об'єктів – від вантажів до людей. У випадках, коли необхідно забезпечити надійне покриття в умовах відсутності інфраструктури та при певних обмеженнях енергозабезпечення, доцільно використовувати технологію LoRa (Long Range). Зокрема, протокол LoRaWAN відкриває перспективи для створення малопотужних сенсорних мереж із великою дальністю передачі сигналу. Однією з перспективних сфер застосування таких рішень є логістика туристичних, рекреаційних та інших маршрутів у важкодоступних місцевостях.

Аналіз досліджень. Використання інтеграції на основі стільникової мережі та смартфону для визначення локації людей на маршрутах було визначено низько-ефективним у зв'язку з:

- високим ступенем енергоспоживання;
- низькою якістю покриття стільниковою мережею.

На рис. 1 наведено приклад туристичного маршруту та якості покриття стільниковою мережею даного маршруту.

а) б)

Рис. 1. Приклад туристичного маршруту (а) та якості покриття стільниковою мережею даного маршруту (б)

Найбільш вагомими характеристиками вибору альтернативних стандартів бездротової передачі даних були радіус покриття сигналу та значна менша ступінь використання енергії [1]. Серед альтернатив були обрані стандарти ZigBee та LoraWan, порівняльна характеристика яких наведена у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика бездротових технологій передачі даних

Технологія	Частота, ГГц	Швидкість передачі, кбіт/с	Радіус покриття, м	Ступінь споживання
LoraWan	0,433; 0,868	0,25–50	Більше ніж 10 000	Низький
ZigBee	0,870; 0,902–0,928; 2,4	20–50	10–100	Низький

У порівнянні з альтернативами, такими як ZigBee або стільниковий зв'язок, LoRaWAN має ряд переваг [2]:

1) великий радіус дії (до 10 км і більше);
2) низьке енергоспоживання;
3) використання безліцензійного частотного діапазону.

Спортивний туризм передбачає проходження визначених маршрутів з подоланням природних і штучних перешкод. Окрім туризму, описані технології знаходять широке застосування в інших галузях:

а) медицина – відстеження місцезнаходження пацієнтів у лікарнях, особливо з деменцією чи іншими когнітивними порушеннями [3];

б) спорт – моніторинг переміщення спортсменів під час тренувань або змагань [4];

в) охорона праці – контроль присутності працівників у небезпечних зонах [5].

Рішення на основі LoRaWAN дозволяють використовувати сенсорні IoT-пристрої для збору даних про маршрут, передачі GPS-координат та фізіологічних показників учасників групи в режимі реального часу [6]. Це значно підвищує безпеку учасників та спрощує процес звітності про проходження маршруту. Визначення найкоротшого маршруту дозволить оптимізувати витрати часу, а також знизити ймовірність помилок. Використання штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє створювати програмні системи, які можуть ефективно координувати процеси зчитання маршрутів [7]. Але, враховуючи складність і віддаленість таких маршрутів, зростає потреба у забезпеченні безпеки та автоматизації збору даних про переміщення груп.

Метою статті є дослідження можливостей використання мережі LoRaWAN для моніторингу локації клієнтів мережі з використанням їх сенсорних IoT-пристроїв, а також розробка рекомендацій щодо впровадження розробленої технології визначення локації для автоматизації збору даних про переміщення туристичних, рекреаційних та інших груп людей у важкодоступних місцевостях та небезпечних зонах.

Виклад основного матеріалу. Класифікація пристроїв у LoRaWAN дозволяє адаптувати систему під конкретні потреби: від повністю автономних сенсорів до пристроїв з постійним зв'язком [8]. Для реалізації системи моніторингу використовуються наступні основні електронні компоненти:

а) ESP32 Dev Board – мікроконтролер з вбудованим Wi-Fi, Bluetooth і високою продуктивністю. Слугує основною обчислювальною платформою пристрою;

б) GPS-модуль NEO-6M – забезпечує визначення поточних координат у глобальній системі позиціонування;

в) LoRa-модуль SX1278 – передає зібрані дані (GPS-координати, швидкість, стан) на центральний термінал через LoRaWAN-мережу;

г) Breadboard – макетна плата для ручного з'єднання компонентів без пайки.

На терміналі відображаються отримані параметри: місце розташування абонента, його швидкість переміщення та час відпочинку. Ця інформація є критично важливою для забезпечення безпеки та ефективного управління груповим туристичним маршрутом.

Сенсорні пристрої кожного учасника періодично надсилають GPS-координати, швидкість руху та інформацію про зупинки (виміряну за допомогою вбудованого акселерометра або проксімі) на центральний шлюз. Термінал, підключений до мережі LoRaWAN, приймає дані та відображає на екрані поточне положення кожного члена туристичної групи, його швидкість переміщення та тривалість періоду відпочинку. Це дозволяє оперативно аналізувати стан маршруту, координувати рух та реагувати на потенційні загрози чи затримки.

Проектування клієнтської та операторної частини

Система складається з двох апаратно-програмних компонентів:

1) *Сенсорний (клієнтський) блок (client node)*, який побудовано на базі мікроконтролера ESP8266 або ESP32, підключеного до модуля GPS (наприклад, NEO-6M) та модуля LoRa (SX1278). Всі компоненти розміщені на макетній платі, що дозволяє оперативно змінювати конфігурацію під час тестування. Цей пристрій фіксує координати клієнта, його рух і стан відпочинку та передає дані через мережу LoRa;

2) *Блок оператора (operator station)*, який отримує дані через LoRa-модуль та виводить їх на екран монітора або LCD-дисплея. На дисплеї показуються ID учасника, швидкість руху та тривалість зупинок. Це дозволяє оператору в реальному часі контролювати стан усіх членів туристичної групи.

На наведеній нижче діаграмі зображено логіку роботи IoT-пристроїв з GPS і LoRa-модулями (рис. 2). Пристрої отримують дані про місцезнаходження клієнтів бездротової мережі, передають їх через LoRaWAN-мережу до терміналів операторів. Це дозволяє відображати в режимі реального часу координати, швидкість та інші дані про стан клієнтів.

Рис. 2. Структурна схема системи моніторингу на базі LoRaWAN

Програмування клієнтського та операторного блоків

Перед створенням програмного забезпечення необхідно домовитися про формат даних, якими будуть обмінюватися клієнти та оператори.

В наведеному випадку формат даних буде таким:

POS: "Longitude": "Latitude" SPD: "Speed" ,RST: "Rest time"

Наприклад:

POS.48.123456,30.123456;SPD.2.51;RST.18

Задачі, які ставляться перед клієнтським блоком розроблюваної моніторингової мережі такі:

1) отримати дані від сенсорів (поточний положення);
2) передати його по мережі LoRa за протоколом LoRaWAN.

Для цього доцільно використати середовище розробки Arduino IDE та бібліотеки *TinyGPSPlus, Lora.*

Нижче наведено каркас програми для передачі моніторингових даних до оператора (рис. 3)

```
#include <TinyGPSPlus.h>
#include <HardwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial gpsSerial(1); // UART1 на ESP32. RX – GPIO16. TX – GPIO17
// Налаштування пінів LoRa-модуля
#define LORA_SS    18
#define LORA_RST   14
#define LORA_DIO0  26

void setup() {
 Serial.begin(115200);
 // GPS UART
 gpsSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17); // RX=16, TX=17
 // Ініціалізація LoRa
 SPI.begin(5, 19, 27, LORA_SS); // SCK, MISO, MOSI, SS
 LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);
 if (!LoRa.begin(433E6)) {
  Serial.println("LoRa init failed. Check connections.");
  while (true);
 }
 Serial.println("LoRa init OK");
}
void loop() {
 while (gpsSerial.available() > 0) {
  gps.encode(gpsSerial.read());
 }

 if (gps.location.isUpdated()) {
  double latitude = gps.location.lat();
  double longitude = gps.location.lng();
  double speed    gps.speed.kmph();
 // Умовно: використати для імітації відлічинку
  unsigned long restSeconds = gps.time.second();
  String message = String("POS.") + latitude + "," + longitude +
                   ";SPD:" + speed +
                   ";RST:" + restSeconds;
  Serial.println("Sending: " + message);
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print(message);
  LoRa.endPacket();
 }
 delay(1000); // Затримка передачі
}
```

Рис. 3. Каркас програми для передачі моніторингових даних до оператора

Задачі, які ставляться перед операторним блоком розроблюваної моніторингової мережі, такі:

1) отримати дані від клієнтів;
2) відобразити ці дані відповідно до потреб оператора на пристроях виведення.

Для цього доцільно використати середовище розробки Arduino IDE та бібліотеки *LiquidCrystal_I2C, Lora.*

Нижче наведено каркас програми для прийому моніторингових даних від клієнтів та відображення їх на LCD-дисплеї (рис. 4).

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// Ініціалізація LCD (адреса 0x27 зазвичай, але може бути 0x3F)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
// Піни для LoRa
#define LORA_SS    18
#define LORA_RST   14
#define LORA_DIO0  26
void setup() {
 Serial.begin(115200);
 // LCD
 lcd.init();
 lcd.backlight();
 lcd.setCursor(0, 0);
 lcd.print("Waiting for data");
 // Ініціалізація LoRa
 SPI.begin(5, 19, 27, LORA_SS); // SCK, MISO, MOSI, SS
 LoRa.setPins(LORA_SS, LORA_RST, LORA_DIO0);
 if (!LoRa.begin(433E6)) {
  lcd.clear();
  lcd.print("LoRa init failed");
  while (true);
 }
 lcd.clear();
 lcd.print("LoRa Ready...");
}

void loop() {
 int packetSize = LoRa.parsePacket();
 if (packetSize > 0) {
  String message = "";
  while (LoRa.available()) {
   message += (char)LoRa.read();
  }
  Serial.println("Received: " + message);
  // Очистити дисплей
  lcd.clear();
 //Розбір повідомлення (очікується формат: POS:lat,lon,SPD:speed,RST:rest)
  int posIndex = message.indexOf("POS:");
  int spdIndex = message.indexOf(",SPD:");
  int rstIndex = message.indexOf(",RST:");
  String pos = message.substring(posIndex + 4, spdIndex);
  String spd = message.substring(spdIndex + 5, rstIndex);
  String rst = message.substring(rstIndex + 5);
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("S:");
  lcd.print(spd);
  lcd.print("km/h");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Rest.");
  lcd.print(rst);
  lcd.print("s");
 }
}
```

Рис. 4. Каркас програми для прийому моніторингових даних від клієнтів та відображення їх на LCD-дисплеї

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Використання LoRaWAN для моніторингу локацій клієнтів з сенсорними IoT-пристроями є перспективним рішенням для задач з обмеженим енергозабезпеченням, великим радіусом покриття та потребою у незалежності від мобільної інфраструктури. Розробка й впровадження таких систем може суттєво підвищити ефективність логістики, безпеки та управління у сфері туризму, медицини, спорту, транспорту та охорони праці.

Список бібліографічного опису

1. Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, Is. 5. P. 60–67. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743.

2. Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J., Watteyne T. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, No. 9. P. 34–40. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600613.

3. Zhuravska I., Dvoretskyi M., Kulakovska I., Boiko A., Dvoretska S. The queue's automated creation of doctor's calls by patients in the hospital with visualization via the mobile application. *Journal of Mobile Multimedia*. 2023. Vol. 19, Is. 3. P. 1–38. DOI: 10.13052/jmm1550-4646.1931.

4. Журавська І. М., Пилипчук Б. В. Технології Інтернету речей для моніторингу фізичних навантажень велосипедистів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 2 (333). С. 329–337. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-333-2-52.

5. Tohoiev O., Burlachenko I., Zhuravska I., Savinov V. The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* : Proc. of the 3rd Int. Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 27 – May 1, 2020 [ed. S. Subbotin]. Vol. 2608. P. 79–90. DOI: https://doi.org/10.32782/cmis/2608-7.

6. US Patent No. US11474593B2. Wearable electronic device and system for tracking location and identifying changes in salient indicators of patient health. *United States Patent and Trademark Office*. 2018. URL: https://patents.google.com/patent/US11474593B2/en (Last accessed: 20.05.2025).

7. Томашко А. Принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2023. № 51. С. 94–100. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-51-12.

8. Saban M., Aghzout O., Medus L. D., Rosado A. Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN under Indoor and Outdoor Environments: Performance and Limitations. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Vol. 54, Is. 4. P. 159–164. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.027.

References

1. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5), 60–67. Retrieved from https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743.

2. Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 34–40. Retrieved from https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613.

3. Zhuravska, I., Dvoretskyi, M., Kulakovska, I., Boiko, A., & Dvoretska, S. (2023). The queue's automated creation of doctor's calls by patients in the hospital with visualization via the mobile application. *Journal of Mobile Multimedia*, 19(3), 1–38. Retrieved from 10.13052/jmm1550-4646.1931.

4. Zhuravska, I., & Pylypchuk, B. (2024). The Internet of Things technologies for monitoring the physical loads of cyclists. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 2(333), 329–337. Retrieved from https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-52 [in Ukrainian].

5. Tohoiev, O., Burlachenko, I., Zhuravska, I., & Savinov, V. (2020). The monitoring system based on a multi-agent approach for moving objects positioning in wireless networks. *CEUR Workshop Proceedings* : Proc. of the 3rd Int. Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, Apr. 27 – May 1, 2020 [ed.: S. Subbotin]. 2608, 79–90. Retrieved from https://doi.org/10.32782/cmis/2608-7.

6. US Patent No. US11474593B2 (2018). Wearable electronic device and system for tracking location and identifying changes in salient indicators of patient health. United States Patent and Trademark Office.

7. Tomashko, A. (2023). Principles of modeling the logistics complex system using machine learning. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (51), 94–100. Retrieved from https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-12 [in Ukrainian].

8. Saban, M., Aghzout, O., Medus, L. D., & Rosado, A. (2021). Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN under Indoor and Outdoor Environments: Performance and Limitations. *IFAC-PapersOnLine*, 54(4), 159–164. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.027.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-07
УДК 519.6
Братінець Оксана Вікторівна, к.ф.-м.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-2635-7203
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ПАКЕТУ MAPLE ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧНОЇ ФІЗИКИ ЧИСЕЛЬНИМИ МЕТОДАМИ.

Братінець О. В. Використання математичного пакету Maple до розв'язання задач математичної фізики чисельними методами. В роботі розглянуто використання математичного пакету Maple до розв'язування задач математичної фізики чисельними методами, таких як мішана крайова задача для рівняння коливання струни, рівняння теплопровідності та задачі Дірихле для рівняння Лапласа. Хоча мішані крайові задачі мають певні складнощі, існує потужний арсенал чисельних методів та програмних застосувань, які дозволяють їх розв'язувати. На прикладі програмного пакету Maple показано не тільки отримання чисельного розв'язку, а і його візуалізацію у вигляді графіків, поверхонь, що дозволяє в розумінні поведінки розв'язку та впливу різних крайових умов. Використання Maple для чисельного розв'язання задач математичної фізики дає змогу студентам-комп'ютерникам та інженерам сконцентруватися на суті проблеми, не доводиться витрачати час на складну реалізацію чисельних алгоритмів. Запис ДРЧП та умов досить простий, задати змінювати параметри рівняння, початкові/крайові умови та параметри сітки для швидкого дослідження поведінки системи, обчислювальні алгоритми оптимізовані та добре перевірені, що забезпечує надійність обчислень. Вивчення чисельних методів передбачає їхню програмну реалізацію, що сприяє розвитку навичок програмування, особливо в області роботи з масивними даними, розробки ефективних алгоритмів та оптимізації коду. Фахівці з глибоким розумінням чисельних методів є затребуваними у багатьох галузях, включаючи IT-компанії, саме тому при вивченні таких методів ми пропонуємо застосування математичного пакету Maple та програмної реалізації на різних мовах програмування.

Ключові слова: диференціальні рівняння з частинними похідними, чисельні методи, метод сіток, рівняння математичної фізики, Maple.

Bratinets O.V. Using the mathematical program Maple to solve mathematical physics problems by numerical methods. The paper considers the application of mathematical program Maple to solve mathematical physics problems by numerical methods, such as a mixed boundary value problem for the string oscillation equation, the heat conduction equation and the Dirichlet problem for the Laplace equation. Although mixed boundary value problems have certain difficulties, there is a powerful arsenal of numerical methods and software tools that allow them to be solved. The example of the Maple software package shows not only obtaining a numerical solution, but also its visualization in the form of graphs and surfaces, which helps in understanding the behavior of the solution and the influence of various boundary conditions. Using Maple for numerical solution of mathematical physics problems allows computer science students and engineers to concentrate on the essence of the problem, they do not have to spend time on complex implementation of numerical algorithms. The writing of the numerical methods and conditions is quite clear, it is easy to change the equation parameters, initial/boundary conditions and mesh parameters for a quick study of the system behavior, the built-in algorithms are optimized and well-tested, which ensures the reliability of the calculations. The study of numerical methods involves their software implementation, which contributes to the development of programming skills, especially in the field of working with data sets, developing effective algorithms and optimizing the code. Specialists with a deep understanding of numerical methods are in demand in many industries, including IT companies, which is why when studying such methods we combine the use of the Maple mathematical package and software implementation in various programming languages.

Keywords: partial differential equations, numerical methods, grid method, equations of mathematical physics, Maple.

Постановка проблеми та аналіз досліджень.

Рівняння математичної фізики – це клас диференціальних рівнянь з частинними похідними (ДРЧП), які описують різноманітні фізичні явища. Невідома функція $U = U(t, x, y, z)$ в таких рівняннях залежить від багатьох змінних (зазвичай це час t та просторові координати x, y, z). Найчастіше використовуються рівняння другого порядку, оскільки згідно із законами механіки перша похідна – швидкість, а друга – прискорення. ДРЧП другого порядку поділяють на три класи в залежності від властивостей їх характеристик:

1) рівняння еліптичного типу описують різноманітні електричні, магнітні та гравітаційні поля (рівняння Лапласа, Пуассона, Гельмгольца);

2) рівняння гіперболічного типу описують хвильові процеси (рівняння коливання струни, хвильове рівняння для звукових та електромагнітних хвиль, рівняння газової динаміки);

3) рівняння параболічного типу описують процеси поширення тепла (теплопровідності) та дифузійні процеси (рівняння теплопровідності, дифузії, рівняння броунівського руху).

Окрім ДРЧП другого порядку математична модель задач математичної фізики містить ще додаткові умови: початкові та/або крайові. Ці умови потрібні для того, щоб виділити єдиний фізично змістовний розв'язок. У фізиці, механіці та інженерії часто зустрічаються змішані крайові

задачі, в яких комбінують різні типи умов (початкові та крайові). Використання чисельних методів до розв'язування таких задач зумовлене багатьма вагомими причинами, вони подають наближений розв'язок у вигляді набору чисел у вузлах сітки, що легко піддається аналізу та візуалізації, на відміну від аналітичного розв'язку, який може мати вигляд нескінченних рядів чи інтегралів, крім того, інколи вони дозволяють отримувати наближені розв'язки для задач, які є абсолютно недоступними для аналітичних методів.

Існує багато потужних програмних пакетів, які реалізують чисельні методи та надають інструменти для візуалізації результатів. Одним із таких пакетів є Maple. Maple є лідером у знаходженні аналітичних розв'язків ДРЧП, він володіє великою бібліотекою відомих розв'язків ДРЧП та різними методами, такими як метод характеристик, використання симетрії Лі та інтегральних перетворень. У випадку неможливості відшукання аналітичного розв'язку у Maple можна знайти чисельні розв'язки, підключивши спеціальні пакети. Також Maple дає потужні інструменти для візуалізації отриманих розв'язків ДРЧП у вигляді графіків, поверхонь, що допомагає зрозуміти поведінку розв'язку та вплив крайових умов. Тому саме Maple з його потужними символьними та чисельними можливостями, а також з можливістю візуалізації, роблять його ефективним для використання студентами, інженерами та дослідниками при вивченні рівнянь математичної фізики. Основи роботи в середовищі цього пакета та використання його до вивчення задач вищої математики можна знайти в [2-4].

Велика кількість прикладних задач у різних галузях науки зводяться до задач математичної фізики. Можливість звести складну фізичну задачу до розв'язання ДРЧП робить їх незамінним інструментом у наукових дослідженнях. Опис таких рівнянь та чисельні методи їх розв'язання можна знайти у багатьох посібниках (див., наприклад [1, 5-7]).

Метою роботи є показати застосування математичного пакета Maple до розв'язування чисельними методами основних задач математичної фізики таких, як рівняння теплопровідності, хвильового рівняння та рівняння Лапласа.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Найбільш поширеним методом розв'язання задач математичної фізики є метод сіток або метод скінчених різниць. Він є простим у розумінні та реалізації, ефективним для задач з простими геометричними областями. Сутність цього методу полягає в тому, що неперервну область, в якій шукають розв'язок задачі замінюють дискретною сіткою вузлів. Вузлами цієї сітки є точки $(x_i, t_j) = (x_0 + ih, t_0 + jk)$, де h, k – відповідно крок по осях Ox та Ot, $i, j = 0, 1, \ldots$ Невідому функцію $U(x,t)$ шукають наближено у вузлах сітки, використовуючи позначення $U_{ij} = U(x_i, t_j)$. Частинні похідні у вузлах сітки апроксимуються скінчено-різницевими співвідношеннями

$$U_t = \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k}, \qquad U_x = \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{h},$$
$$U_{tt} = \frac{U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{k^2}, \quad U_{xx} = \frac{U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2}. \tag{1}$$

Рівняння коливання струни. Розглянемо змішану крайову задачу для рівняння коливання струни:

$$U_{tt} = U_{xx}, \tag{2}$$

з граничними умовами:

$$U(0,t) - p(t), \;\; U(L,t) - q(t), \tag{3}$$

та початковими умовами:

$$U(x,0) = f(x), \;\; U_t(x,0) = g(x). \tag{4}$$

Розв'язок будемо шукати в області $D: \{0 \le x \le L, \;\; 0 \le t \le +\infty\}$. Початкові та крайові умови повинні бути узгодженими, тобто:

$$p(0) = f(0), \;\; q(0) = f(L), \;\; p'(0) = g(0), \;\; q'(0) = g(L).$$

Використовуючи (1) замінимо задачу (2)-(4) її скінчено-різницевим аналогом:

$$\frac{U_{i,j-1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{k^2} - \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2}, \tag{5}$$
$$U_{0,j} = p_j, \;\; U_{n,j} = q_j, \;\; j = 0, 1, 2, \ldots, \tag{6}$$
$$U_{i,0} = f_i, \;\; U_{i,1} = U_{i,0} + kg_i, \;\; i = 0, 1, 2, \ldots. \tag{7}$$

Умови (6)-(7) задають значення функції $U(x,t)$ на границі області D. Якщо позначити через $\lambda = \frac{k}{h}$, то рівняння (5) зведеться до вигляду

$$U_{i,j+1} = 2(1-\lambda^2)U_{i,j} + \lambda^2(U_{i+1,j} + U_{i-1,i}) - U_{i,j-2}, i = \overline{1, n-1}; j = 1, 2, \ldots \quad (8)$$

Розв'язок різницевої задачі (5)-(7) рівномірно збігається з розв'язком крайової задачі (2)-(4) при $h \to 0, k \to 0$, якщо $\lambda < 1$, тобто $k < h$.

Приклад реалізації методу сіток для задачі (2)-(4) в Maple

Розв'язок подається у вигляді таблиці значень шуканої функції $U(x,t)$ у вузлах сітки. Більш цікавим є отримання візуалізації розв'язків задачі таких як: форма струни в певний момент часу t або зміна $U(t)$ у фіксованих точках x (рис. 1)

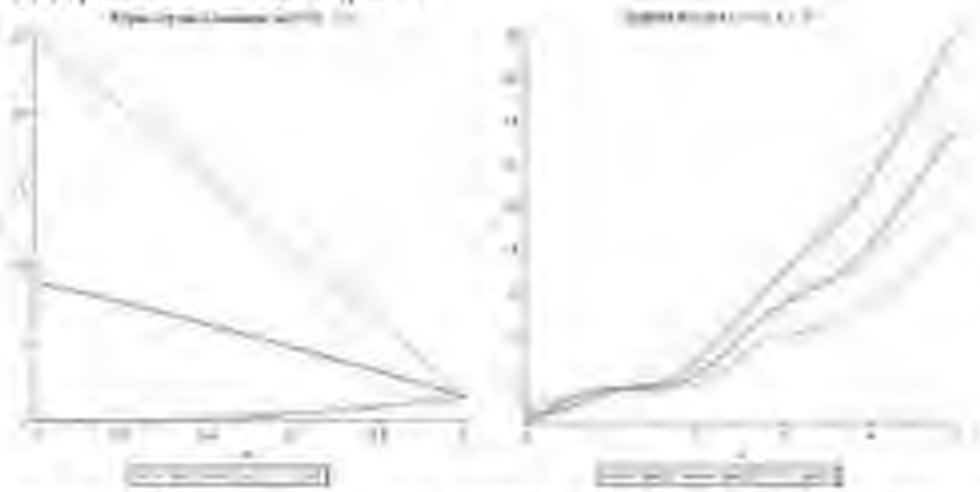


Рис. 1 Візуалізація розв'язків, отриманих для змішаної крайової задачі рівняння коливання струни в Maple

Рівняння теплопровідності. Розглянемо ДРЧП параболічного типу на прикладі рівняння теплопровідності. Змішана крайова задача для такого рівняння має вигляд

$$U_t = U_{xx}, \quad (9)$$

з граничними умовами

$$U(0,t) = p(t), \; U(L,t) = q(t), \quad (10)$$

та початковою умовою

$$U(x,0) = f(x). \tag{11}$$

Розв'язок будемо шукати в області $D: [0 \le x \le L,\ 0 \le t \le +\infty]$. Початкова та крайові умови повинні бути узгодженими, тобто

$$p(0) = f(0),\ \ q(0) = f(L).$$

Використовуючи (1) замінимо задачу (9)-(11) її скінчено-різницевим аналогом

$$\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j}}{k} = \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2}, \tag{12}$$

$$U_{0,j} = p_j,\ \ U_{n,j} = q_j,\ \ j = 0,1,2,\ldots,\ \ U_{i,0} = f_i,\ \ i = \overline{0,n}. \tag{13}$$

Умови (13) задають значення функції $U(x,t)$ на границі області D. Якщо позначити через $\lambda = \frac{k}{h^2}$, то рівняння (12) зведеться до вигляду

$$U_{i,j+1} = \lambda U_{i-1,j} + (1-2\lambda)U_{i,j} + \lambda U_{i+1,j}, i = \overline{1,n-1},\ j = 1,2,\ldots \tag{14}$$

Процес розв'язання збігається і є стійким, якщо $\lambda \le 0{,}5$, тобто $k < \frac{h^2}{2}$.

Приклад реалізації методу сіток для задачі (9)-(11) в Maple.

```
restart:
with(plots):
a := 1:          # коефіцієнт температуропровідності
L := 1:          # довжина стержня
n := 10:         # кількість вузлів
h := L/n:        # крок по x
k := 0.4*h^2:    # крок по t (умова стійкості)
lambda := a*k/h^2:
f := x -> sin(Pi*x/L):   # початкова умова
p := t -> 0:             # ліва границя
q := t -> 0:             # права границя
x := [seq(i*h, i=0..n)]:
U := [seq(f(x[i]), i=1..n+1)]:
for j from 1 to 100 do
  Unew := U:
  for i from 2 to n do
    Unew[i] := lambda*U[i-1] + (1-2*lambda)*U[i] + lambda*U[i+1]:
  end do:
  Unew[1] := p(j*k):
  Unew[n+1] := q(j*k):
  U := Unew:
end do:
plot([seq([x[i], U[i]], i=1..n+1)], title="Розподіл температури в стержні",
     xlabel="x", ylabel="U(x,t)");
```

В рівнянні (9) функція $U(x,t)$ задає температуру в будь-якій точці стержня довжиною L на момент часу t. Візуалізація розподілу температур в різні моменти часу, отримана в Maple та Python продемонстрована на рис. 2.

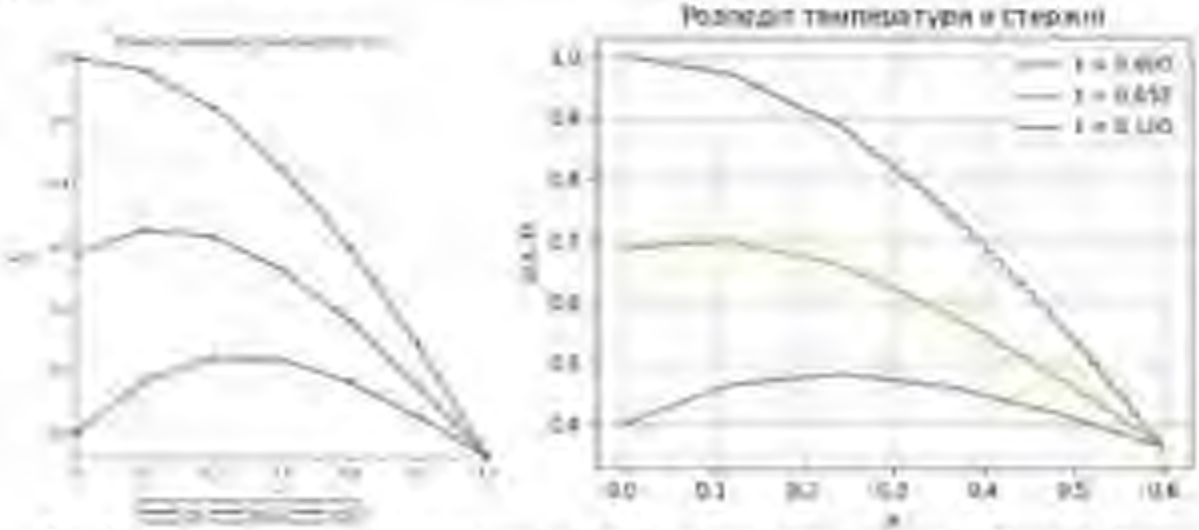


Рис. 2. Візуалізація розподілу температур в різні моменти часу, отримана в Maple та Python

Задача Дірікле для рівняння Лапласа. Розглянемо рівняння еліптичного типу, до яких приводить дослідження стаціонарних процесів, коли шукана функція не залежить від часу. Прикладом такого рівняння є рівняння Лапласа. Розглянувши його з граничними умовами по координатах x, y, отримаємо першу крайову задачу або задачу Дірікле:

$$\Delta U = 0,\ U(x,0) = f(x),\ U(x,b) = g(x),\ U(0,y) = p(y),\ U(a,y) = q(y). \qquad (15)$$

Розв'язок будемо шукати в області $D: \{0 \le x \le a,\ 0 \le y \le b\}$.

Використовуючи (1) замінимо задачу (15) її скінчено-різницевим аналогом

$$\frac{U_{i,j+1} - 2U_{i,j} + U_{i,j-1}}{h^2} + \frac{U_{i+1,j} - 2U_{i,j} + U_{i-1,j}}{h^2} = 0, \qquad (16)$$

або

$$2(h^2 + k^2)U_{i,j} = k^2\left(U_{i+1,j} + U_{i-1,j}\right) + h^2\left(U_{i,j+1} + U_{i,j-1}\right), i = \overline{1, n-1}; j = 1, 2, \ldots \qquad (17)$$

Знаходимо значення $U_{i,j}$, які відповідають граничним вузлам завдяки граничним умовам (15). Для всіх внутрішніх вузлів сітки записуємо рівняння (17) та отримаємо СЛАР з досить великою кількістю рівнянь та невідомих. Отриману систему алгебраїчних рівнянь можна розв'язати, використовуючи прямі або ітераційні методи [8].

Приклад реалізації методу сіток для задачі (15) в Maple

Таблиця значень та візуалізація отриманого розв'язку:

```
Ітерацій виконано: 14
Таблиця значень u(x,y):
   1.0000    0.5000    0.0000   -0.5000   -1.0000
   0.5000    0.3750    0.3214    0.4107    0.7500
   0.0000    0.2795    0.4899    1.0714    2.0000
  -0.5000   -0.1608    0.4285    1.3750    2.7500
  -1.0000   -0.7500    0.0000    1.2500    3.0000
```

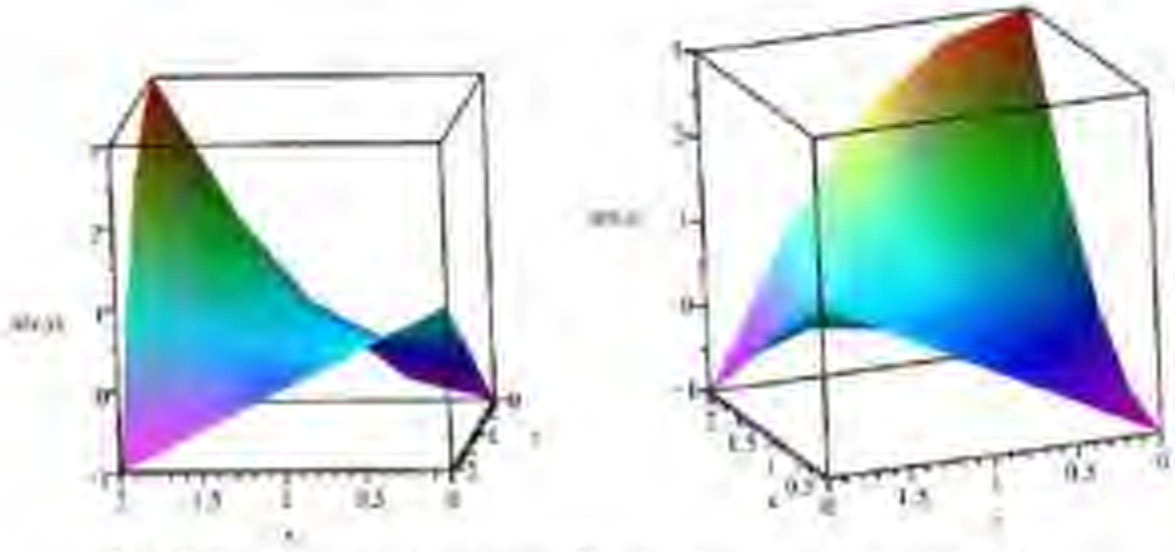


Рис. 3. Візуалізація розв'язку задачі Діріхле для рівняння Лапласа в Maple

Задля чинним алгоритмам чисельних методів розв'язання задач математичної фізики студентам пропонується написати програми з візуалізацією отриманих розв'язків будь-якою мовою програмування, наприклад на C++, Python або Java, та провести аналіз програмної реалізації з розв'язанням в середовищі Maple.

Використання програмних пакетів та програмної реалізації до вивчених методів значно скорочує час, який необхідно витратити для отримання розв'язку складної задачі. Є можливість отримати результат за досить короткий час замість багатьох годин ручної роботи, що дозволяє більше зосередитися на аналізі результатів та прийнятті рішень. Крім того, програмні пакети добре протестовані, тому забезпечують більш точні та надійні результати. За допомогою програмної реалізації є можливість отримати не тільки розв'язок поставленої задачі, а ще й візуалізацію результатів, що значно полегшує розуміння складних процесів.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В статті були розглянуті три задачі математичної фізики, що описуються диференціальними рівняннями з частинними похідними другого порядку різних типів. До кожної задачі надано короткий алгоритм відшукання її розв'язку та показано як вони реалізуються в системі комп'ютерної математики Maple з візуалізацією отриманих результатів. Надалі планується продовжити серію статей, які будуть присвячені вивченню інших розділів курсу «Чисельні методи» з використанням Maple.

Список бібліографічного опису

1. Задорожна Н.М., Комісарчик І.Г. (2014) Чисельні методи: навчальний посібник. Х.: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 180 с.
2. Ніколаєнко О.М. (2014) Maple: Розв'язання інженерних та наукових задач: Навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 289 с.
3. Михалевич В.М. (2004) Навчально-контролюючий Maple – комплекс з вищої математики. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, № 1, С. 74-78.
4. Воробйова А.І., Журавель О.В. (2009) Симетрійний аналіз диференціальних рівнянь з частинними похідними за допомогою математичного пакету Maple. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Сер.: Комп'ютерні технології. Т. 106, вип. 93, С. 75-79.
5. Андрунишин В.А., [illegible] В.А., [illegible] В.В., [illegible] Л.Б., [illegible] Л.В. (2020) Чисельні методи в комп'ютерних науках: навчальний посібник. Львів: Видавництво «Новий світ – 2000», 470 с.
6. [illegible] Л.О., Зелінська О.В., [illegible] Н.А., [illegible] І.А. (2020) Чисельні методи. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 322 с.
7. Гой Т.П., Юнчик М.І., Федак І.В. (2010) Наближені методи розв'язування диференціальних рівнянь. Навчальний посібник для студентів напряму підготовки "математика" та "прикладна математика". – Івано-Франківськ: Видавничо-дизайнерський відділ Центру інформаційних технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 148 с.
8. Браницька О.В., Воробйова А.І. (2022) Використання математичного пакету Maple до розв'язання СЛАР прямими чисельними методами // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. № 47. С. 55-63.

References

1. Zahaikin V.M., Kosyuchenko I.H. (2014) Numerical methods: a training manual. Kharkiv: Vyd. KHNUE im. S. Kuznetsya. 180 p.
2. Nikitenko O.M. (2014). Maple: Solving engineering and scientific problems: a training manual. Kharkiv: NURE. 280 p.
3. Mykhaleych V. M. (2008) Educational and control Maple – a complex of higher mathematics. Information technology and computer engineering. No 1. pp. 74-78.
4. Vorobyova A.I. Kurilska O.V. (2009) Symmetric analysis of partial differential equations using the Maple mathematical package. Scientific works of the Petro Mohyla Black Sea State University. Ser. : Computer Technologies. Vol. vol. 93. pp. 75-79.
5. Andrunyk V.A., Vyvenska V.A., Pasichnyk V.V., Chyrun L.B., Chyrun L.V. (2020) Numerical Methods in Computer Science: Textbook - Lviv: Vydavnytstvo «Novyy svit - 2000», 470 p.
6. Volosyuk I. O., Zahaika O.V., Potapova N.A., Chikov I.A. (2020) Numerical methods: Textbook. - Vinnytsya: VNAU. 322 p.
7. Gay Y.P., Kopach M.I., Falak I.V. (2010) Approximate methods for solving differential equations: A textbook for students of the "mathematics" and "applied mathematics" training areas. – Ivano-Frankivsk: Publishing and design department of the Center for Information Technologies of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. 348 p.
8. Bratchuk O., & Vorobyova A. (2022). Using the mathematical program Maple to solve systems of linear algebraic equations by direct numerical methods. Computer-integrated technologies: education, science, production, (47), 55-63. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-08

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-08
УДК 004.45
Булатецька Леся Віталіївна, канд. ф.-м. наук, доцент
https://orcid.org/0000-0002-7202-826X
Булатецький Віталій Вікторович, к. ф.-м. н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-9883-4550
Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБКА .NET-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМНОГО РОЗДІЛУ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ WINDOWS 11

Булатецька Л. В., Булатецький В. В. Розробка .NET-застосунку для оптимізації системного розділу операційної системи Windows 11. У сучасних операційних системах Windows накопичення тимчасових файлів, резервних копій оновлень, файлів відмови та точок відновлення призводить до значного споживання дискового простору. Це особливо актуально для системних розділів, де обмежений обсяг накопичувача може негативно впливати на продуктивність та стабільність роботи ОС. В роботі розглянуто основні механізми та методи вивільнення простору системного розділу в процесі експлуатації операційної системи Windows 11. У цій роботі запропоновано підхід до автоматизованого очищення системного розділу Windows шляхом розробки .NET-застосунку та скрипта до нього. Розглянуто основні джерела заповнення системного розділу, включаючи файли підкачки (pagefile.sys, swapfile.sys), каталоги оновлень (WinSxS, SoftwareDistribution), тіньові копії, логи браузерів і дамп-файли. Проаналізовано стандартні засоби Windows для керування дисковим простором, такі як «Очищення диска» (cleanmgr), PowerShell-команди тощо. Встановлено, що жоден з існуючих інструментів повністю не забезпечує безпечного й глибокого очищення системного розділу. Було виявлено дослідження потреби у комплексному підході до аналізу та автоматизованого очищення системного розділу Windows. Запропоноване рішення дозволяє не лише автоматизувати процес видалення непотрібних файлів, а й підвищити ефективність керування ресурсами диска, що в результаті сприяє покращенню продуктивності та стабільності роботи операційної системи. Очікувані результати включають зменшення займаного простору на системному розділі, що сприятиме підвищенню продуктивності та стабільності роботи операційної системи. Крім того, автоматизація цього процесу спрощує роботу як для досвідчених користувачів, так і для тих, хто не має глибоких технічних знань.

Ключові слова: операційна система, системний розділ, оптимізація, системний реєстр, пакетний файл, PowerShell, інтерпретатор командного рядка, технології .NET

Bulatetska L., Bulatetskyi V. Development of a .NET Application for Optimizing the System Partition of the Windows 11 operating system. In modern Windows operating systems, the accumulation of temporary files, update backups, paging files, and restore points leads to significant disk space consumption. This is particularly critical for system partitions, where limited storage capacity can negatively impact the performance and stability of the OS. This paper examines the main mechanisms and methods for freeing up space on the system partition during the operation of Windows 11. The study proposes an approach to automated cleaning of the Windows system partition through the development of a .NET application and accompanying scripts. It explores the main sources of system partition filling, including paging files (pagefile.sys, swapfile.sys), update directories (WinSxS, SoftwareDistribution), shadow copies, browser caches, and log files. Standard Windows tools for managing disk space, such as "Disk Cleanup" (cleanmgr), PowerShell commands, etc., are analyzed. It was determined that none of the existing tools fully provide a safe and flexible method for cleaning the system partition. The scientific novelty of the research lies in a comprehensive approach to the analysis and automation of system partition cleanup in Windows. The proposed solution not only automates the process of removing unnecessary files but also enhances disk resource management efficiency, ultimately contributing to improved performance and stability of the operating system. Expected results include a reduction in occupied space on the system partition, which will contribute to enhanced OS performance and stability. Moreover, automation of this process simplifies the task for both advanced users and those without deep technical knowledge.

Keywords: Operating System, System Partition, Optimization, System Registry, Batch File, Powershell, Command Line Interpreter, .NET Technologies

Постановка проблеми. Нові версії операційних систем Windows займають дедалі більше місця на системному розділі жорсткого диска. Це пов'язано з додаванням нових компонентів, регулярними оновленнями та виправленнями, збереженням користувацьких файлів і створенням резервних копій. У результаті системний розділ (%systemdrive%), де міститься сама операційна система, з часом заповнюється інформацією, яка не завжди є критично важливою, проте викликає дефіцит вільного дискового простору. Це негативно впливає як на швидкодію операційної системи, так і на функціонал та, навіть, на можливість подальшого безперебійного отримання оновлень та виправлень. Збільшення розміру системного розділу не завжди можливе, особливо для невеликих твердотільних накопичувачах, або за браку вільного місця на інших розділах. Тому виникає потреба дійсними очищення (cleanup) такого розділу з метою мінімізації втрат вільного простору під час її подальної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд інструментів для оптимізації системного розділу шляхом його очистки. У роботах [1, 2, 3] розглянуто утиліту DISM та при

безкоштовні програми: PatchCleaner, Wise Disk Cleaner і DISM++. Хоча їх основне призначення різне, усі вони містять функції для очищення дискового простору. Жодна з них не охоплює всі можливі методи, проте кожна реалізує окремі ефективні підходи. Водночас деякі завдання можна виконати лише штатними утилітами або вручну з правами адміністратора.

У роботах [1, 2, 3] проаналізовано причини нестачі вільного місця на системному розділі під час експлуатації Windows 11. Досліджено структуру розділів носія при встановленні поширених операційних систем Microsoft, а також основні системні файлові об'єкти, їхні розташування, призначення та вплив на використання простору системного розділу. Наведено перелік найбільш об'ємних файлів і папок, очищення або налаштування яких дозволяє значно зекономити місце. Каталог %windir%\Installer займає значний обсяг на диску, містячи .msi та .msp файли, патчі та інсталятори, які використовує Windows Installer для оновлення та видалення програм. Каталог %windir%\WinSxS зберігає резервні копії системних файлів для можливості відміни оновлень. Звичайне видалення небезпечне, тому для очищення слід використовувати засіб DISM [4]. Windows підтримує стиснення системних файлів через, що дозволяє зменшити займаний простір у %windir% та Program Files на декілька гігабайт. Файл гібернації (hiberfil.sys) як правило займає простір, рівний обсягу оперативної пам'яті. Відключення гібернації через powercfg /h off дозволяє звільнити місце. У %windir%\System32\DriverStore зберігаються драйвери пристроїв, включаючи старі версії. Деякі виробники дублюють драйвери у власних каталогах (наприклад %windir%\Drivers\Xerox), які також можна очистити без наслідків. На всіх накопичувачах (зокрема системному) є прихований каталог System Volume Information, який може займати десятки гігабайт. Він містить точки відновлення Windows, бази індексації, унікальний ідентифікатор диска та дані тіньового копіювання. SWAP-файл призначений для вивільнення оперативної пам'яті, зберігаючи тимчасові дані на диск (pagefile.sys, swapfile.sys), що допомагає при нестачі оперативної пам'яті, але з сучасними обсягами пам'яті потреба у ньому майже відпадає. Такий файл (файли) підкачки автоматично створюється Windows і може займати кілька гігабайт, навіть якщо не використовується. Його можна вимкнути через налаштування системи або командний рядок. Крім того в операційній системі є цілий список шляхів до каталогів із тимчасовими файлами, які теж періодично необхідно очищати (%SystemDrive%\Temp\, %SystemRoot%\Temp\, %SystemDrive%\Users\%username%\AppData\Local\Temp\, %SystemRoot%\System32\DriverStore\Temp\). В роботі [3] подано ряд скриптів, які можна використовувати при написанні пакетних файлів, сценаріїв, файлів реєстру, що дає можливість автоматизувати процес очистки системного розділу.

Постановка завдання. Оптимізація системного розділу операційної системи є важливим аспектом забезпечення його стабільної та ефективної роботи. Одним із ключових завдань є вивільнення дискового простору, що може здійснюватися різними методами, використанням штатних інструментів, прихованих системних утиліт, стороннього програмного забезпечення або безпосередньо через зміну налаштувань операційної системи. Подібні маніпуляції досить тривалі, деякі з них вимагають дотримання послідовності їх виконання, отримання доступу до суміжних засобів та об'єктів, пошуку сторонніх засобів тощо. Використання таких методів може бути складним для пересічного користувача, вимагати значного часу та знань про внутрішню структуру операційної системи. Тому виникає необхідність організувати цей процес, враховуючи всі можливі особливості та потенційні труднощі, що можуть виникнути під час оптимізації. У зв'язку з цим актуальним є розробка програмного рішення, яке дозволить автоматизувати процес очистки та оптимізації системного розділу. Такий підхід забезпечить швидкість виконання, мінімізує ризики помилок та спростить роботу з оптимізацією для користувачів будь-якого рівня.

Метою роботи є вивчення механізмів і засобів очистки та налаштування операційної системи для оптимізації системного розділу, а також розробка програмного засобу, який дозволить автоматизувати цей процес у середовищі Windows 11. Такий програмний продукт повинен інсталюватись в операційну систему і не викликати труднощів при своєму запуску та роботі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити об'єкти операційної системи, які підлягають очищенню та оптимізації;
- розробити програмний засіб для автоматизації очистки системного розділу операційної системи;
- оцінити ефективність запропонованого рішення.

Виклад основного матеріалу. Крім визначених у роботах [1, 2, 3] системних папок (Installer, WinSxS, DriverStore, Xerox, System Volume Information, Temp), а також файлів гібернації

(hiberfil.sys). SWAP-файлів і залишкових файлів оновлень, розмір яких суттєво впливає на зайнятий простір системного розділу, існує також ряд інших файлів і налаштувань, що сприяють накопиченню надлишкового місця [5].

Windows 11 за замовчуванням містить набір Modern- або UWP-застосунків (раніше вони називалися Metro Apps або APPX), таких як Калькулятор, Календар, Пошта, Кортана, Карти, Новини, OneNote, Groove Music, Камера тощо. Ці програми автоматично встановлюються в профіль користувача при першому вході в систему та займають додатковий дисковий простір. Оскільки більшість із них не використовуються широким колом користувачів, часто виникає потреба у їхньому видаленні для вивільнення ресурсів. Необхідно правильно видалити вбудовані UWP/APPX програми у Windows 11, що дозволить зберегти додаткове місце на системному розділі та вилучить непотрібні елементи у стартовому меню.

Є UWP-застосунки, які не можна видалити за допомогою панелі керування або налаштувань у Windows 11. Для видалення цих програм потрібно використовувати PowerShell або сторонні утиліти. Для того, щоб видалити такі застосунки через Powershell спочатку необхідно отримати повний список встановлених таких застосунків, адже стандартні засоби операційної системи із панелі керування не дозволяють усіх їх показати. Такий список необхідний для визначення точного імені застосунку, яке надалі буде використовуватись у скриптах Powershell для видалення. Команда Get-AppxPackage | Select Name, PackageFullName повертає список встановлених застосунків. Видаляти такі застосунки можна або для конкретного користувача (що не зекономить місце на накопичувачі), або для усіх користувачів.

На системному розділі Windows іноді з'являється прихована папка CONFIG.MSI, і при тривалій експлуатації системи її розмір може сягати кількох сотень мегабайт. Папка містить збережені резервні копії системних файлів, замінених під час інсталяції різних програм за допомогою стандартного інсталятора Windows Installer. Процес встановлення програмного забезпечення далеко не завжди протікає без ускладнень. Іноді трапляються збої або користувач перериває установку. У цьому випадку інсталятор здійснює відкат і повертає систему в початковий стан. Перш ніж приступити до виконання цієї операції, Windows Installer зберігає всю інформацію про замінені папки і файли, гілки і ключі реєстру Windows, і генерує скрипт для відкату установки. Ця інформація зберігається в спеціальному прихованому каталозі, який створюється в корені системного диска під час встановлення. Якщо інсталяцію програми було завершено успішно, то потреби у резервних копіях немає, і вони повинні видалятися. Однак так відбувається не завжди, зокрема, резервні копії не зникнуть, якщо процес установки був перерваний аварійно. Тому в папці %SystemDrive%\CONFIG.MSI з часом накопичуються непотрібні файли.

Для ефективного очищення системного розділу операційної системи Windows 10 пропонується наступний порядок дій:

1. перевірка та очищення таких системних папок, як Installer, WinSxS, DriverStore, Xerox, System Volume Information;
2. видалення файлів гібернації та SWAP-файлів, а у разі необхідності можна вимкнути гібернацію або налаштувати параметри використання SWAP-файлів для зменшення їх розміру;
3. видалення залишкових файлів оновлень, очищення (видалення) папок CONFIG.MSI, $GetCurrent, $WinREAgent, $Windows.~WS, Windows.old;
4. стиснення системних файлів за допомогою compact os;
5. видалення невикористовуваних UWP/APPX програм;
6. очищення тимчасових файлів.

В процесі очистки користувачі можуть припускатись помилок, тим самим пошкоджуючи операційну систему та її файлову структуру. В таких випадках варто скористатись штатною консольною утилітою SFC, яка дозволяє сканувати та відновлювати пошкоджені або відсутні системні файли. Для оптимізації системи варто також бачити та керувати списком програм, які запускаються при завантаженні операційної системи.

Ці рекомендації допоможуть оптимізувати використання системного диска та підвищити продуктивність операційної системи, що особливо важливо для користувачів, які працюють з обмеженими ресурсами пам'яті.

Для реалізації засобів очищення та налагодження операційної системи найбільш простим і водночас ефективним підходом є виконання майже кожного процесу окремо у вигляді незалежних пакетних або інших сценаріїв, запущених у власних ізольованих процесах (якщо вони не залежні

один від одного). Тобто фактично відбувається передача керування процесами самій операційній системі, в якій такий механізм передбачено заздалегідь і який найкраще справиться з поставленою задачею і не виникне конфліктів. Основними інструментами для задіяння можливостей операційної системи є виконання скриптів та виклику функцій системних бібліотек, шляхом використання інтерпретатора командного рядка (cmd) [6], робочим середовищем Windows PowerShell (WPS) [7], редактором системного реєстру (regedit) [8] та різноманітними системними утилітами типу RunDLL32 [9]. Більшість цих інструментів має власний користувацький інтерфейс, або використовує інтерфейс операційної системи, через який можливе виконання відповідних скриптів, команд та утиліт.

При написанні скриптів для очищення каталогів часто потрібно передбачити видалення вмісту каталогу без видалення самого каталогу та уникати сторонніх повідомлень про помилки. Наприклад, при очищенні тимчасових файлів, важливо не лише видалити файли, а й забезпечити відсутність помилок під час виконання скрипта:

```
[illegible]
```

В процесі очистки часто виникають ситуації, коли не завжди можна повністю автоматизувати такий процес, або іноді необхідно зробити попередні маніпуляції, які вимагають додаткових знань, дій або засобів. В розширене контекстне меню (викликається на файловому об'єкті з утримуванням клавіші Shift) операційної системи для роботи з файлами та папками можна через реєстр ввести додаткову команду, яка дозволяє швидко привласнити користувачеві будь-яку папку чи файл разом із повними правами доступу до неї (Get Owner). Для цього можна створити пакетний файл, що вносить зміни до відповідних ключів реєстру:

```
[illegible]
```

Організація всіх інструментів та написаних пакетних файлів для очищення системного розділу в один застосунок дозволяє автоматизувати процес, зменшити кількість кроків для користувача та мінімізувати ризики помилок, що значно підвищує ефективність і зручність оптимізації системи.

Враховуючи одну із вимог, що стоїть перед середовища виконання та організації процесів для розробки інтегрованого середовища та запуску окремих сценаріїв незалежно один від одного, було обрано платформу .NET, зокрема середовище програмування Microsoft Visual C#, що має можливість створення проектів з консольними застосунками та застосунками з візуальним інтерфейсом [10]. Такі пакетні файли запускаються через код додатка на C# як окремий процес відповідного класу простору імен.

Однак у процесі розробки програмного застосунку виникли певні проблеми, зокрема реалізація механізму видалення UWP-застосунків для всіх користувачів. Для цього передбачено використання команди:

```
Get-AppxPackage -allusers *xxxxx* | Remove-AppxPackage
```

де xxxxx – точне ім'я програми.

Проте запуск такого типу команд із застосунку C# в якості окремого процесу неможливий, доки не надано дозвіл на запуск скриптів Powershell з командного рядка, а отже і пакетного файлу, які ми використовуємо. За замовчуванням такий запуск з міркувань безпеки в операційній системі заборонено, хоча сама команда в складі скрипту дозволена на виконання з середовища Powershell. Повністю дозволити запуск скриптів Powershell з командного рядка недоцільно, оскільки це підвищує рівень уразливості операційної системи, проте можна надати такий дозвіл окремо для кожної команди в межах окремого екземпляру середовища її виконання, адже такий екземпляр після виконання буде закритий, а, отже, і дозвіл буде відмінений. Для цього в пакетному файлі скористаємось командою -executionpolicy bypass -command перед командою, яка виконуватиметься. Проте ця команда фізично повністю не видаляє застосунки з розділу, а лише відмінює їх реєстрацію. Для їх видалення необхідно з каталогу %Systemdrive%\Program files\WindowsApps\ видалити папку(и) відповідного застосунку, що зручно також зробити за допомогою середовища Powershell через командний рядок, попередньо перебравши на себе права власності на такі об'єкти і встановивши відповідні права доступу.

В результаті було отримано програмний продукт OSP (Optimization of System Partition), який містить більше 60 пакетних файлів та інших скриптів, що запускаються через інтуїтивне середовище, а також 4 пакети сторонніх утиліт, що викликаються з основної програми (https://github.com/NomadCatB/OSP-202x).

Використовуючи розроблений програмний засіб орієнтовно можна зекономити від кількох до кількох десятків гігабайт. Зрозуміло, що результати будуть різнитись між окремими конкретними системами. Ефективність очистки та оптимізації системного розділу оцінювалась за об'ємом звільненого простору після роботи OSP, та в динаміці його зміни в процесі типової експлуатації операційної системи.

Для правильного аналізу функціоналу існуючих розробок та розробленого програмного продукту було оформлено порівняльну таблицю (табл. 1).

Таблиця 1. – Порівняння існуючого програмного забезпечення по досліджуваному функціоналу з розроблюваним: «+» – наявна функція, «-» – відсутня, «+/-» – частково присутня [2].

Каталоги для очистки, або інші методи вивільнення простору	PatchCleaner	Wise Disk Cleaner	DISM	DISM++	OSP
%systemroot%\installer\	+	–	–	–	+
%systemroot%\installer\$PatchCache$	–	–	–	–	+
%systemroot%\installer*.tmp	–	–	–	–	+
%systemroot%\winSxS\	–	+/-	+	+	+
%systemroot%\winSxS\Backup	–	–	–	+	+
Стиснення системних файлів	–	–	–	–	+
%systemroot%\system32\DriverStore	–	–	+	+	+
%systemroot%\system32\DriverStore\ \FileRepository	–	–	+	+	+
Керування гіберфайлом	–	–	+	+	+
Керування віртуальною пам'яттю	–	–	+	–	+
Видалення тимчасових файлів	+	+	–	+	+
Керування UWP	–	–	–	+	+
Видалення файлів пакетів оновлень	–	+/-	–	–	+
System Volume Information	–	–	+	–	+

Як видно з табл.1, існує низка задач, які не реалізовані в жодному з розглянутих існуючих застосунків і можуть бути виконані виключно за допомогою вбудованих системних утиліт або вручну користувачем із правами адміністратора. Такий функціонал реалізовано в застосунку OSP.

Висновки. В роботі розглянуто основні механізми та методи вивільнення простору системного розділу в процесі експлуатації операційної системи Windows 11. Як результат був розроблений програмний засіб OSP (Optimization of System Partition), який здатен здійснювати поетапну, або вибіркову (за бажанням користувача) очистку системного розділу та змінювати окремі налаштування операційної системи Windows 11 вивільняючи місце на системному розділі, тим самим роблячи систему більш стабільною та ефективнішою у роботі (https://github.com/NomadCatB/OSP-202x). Для розробки програмного засобу було використано можливості інтерпретатора командного рядка, розширений засіб роботи з інтерфейсом командного рядка PowerShell, засоби виклику системних бібліотек та інструменти для роботи з реєстром операційної системи. В якості середовища розробки кінцевого програмного продукту було використано Microsoft Visual C#. Розроблений програмний продукт може бути використаний як звичайними користувачами, які мають права адміністратора на локальних системах, так і адміністраторами систем, мережевими адміністраторами в якості основного інструменту для очищення робочих станцій в процесі експлуатації.

Перспективи подальшого дослідження можуть включати адаптацію розробленого програмного засобу для нових версій операційної системи Windows та розширення функціоналу, пов'язаного з очисткою.

Список бібліографічного опису:

1. Булатецький В. В., Булатецька Л. В., Пруц Е. С. Методи та засоби вивільнення простору системного розділу ОС Microsoft Windows 10. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2018. № 32. С. 85–89.
2. Bulatetskyi V., Bulatetska L., Hryshanovych T. ANALYSIS OF OS WINDOWS 10 FILE OBJECTS FOR SYSTEM PARTITION SPACE CLEANING AND OPTIMIZATION. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*. 2022. Vol. 3, no. 15. P. 71–84. URL: https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.15.7184 (date of access: 2.03.2025).
3. Research methods and tools for cleaning the system partition of Windows operating systems / A. P. Stupin, V. V. Bulatetskyi, L. V. Bulatetska, T. O. Hryshanovych, Yu. S. Pavlenko. *Computer Science & Software Engineering (CSSE-SUT 2021)* : Proceedings of the 4th Workshop for Young Scientists. Kryvyi Rih, 18 December 2021. 2022. P. 135–145. URL: http://ceur-ws.org/Vol-3077/paper17.pdf.
4. DISM Image Management Command-Line Options. Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/manufacture/desktop/dism-image-management-command-line-options-s14?view=windows-11 (date of access: 23.03.2025).
5. DISM Image Management Command-Line Options. *Microsoft Learn. Build skills that open doors in your career.* URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/manufacture/desktop/dism-image-management-command-line-options-s14?view=windows-11 (date of access: 23.03.2025).
6. end. *Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career*. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/windows-commands/end (date of access: 23.03.2025).
7. What is PowerShell? - PowerShell. *Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career*. URL: https://docs.microsoft.com/en-us/powershell/scripting/overview?view=powershell-7.1 (date of access: 23.03.2025).
8. How to add, modify, or delete registry subkeys and values by using a .reg file - Microsoft Support. *Microsoft Support*. URL: https://support.microsoft.com/en-us/topic/how-to-add-modify-or-delete-registry-subkeys-and-values-by-using-a-reg-file-9c7f37cf-a5e9-e1cd-c4fa-2a26218a1a23 (date of access: 23.03.2025).
9. rundll32. *Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career*. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/windows-commands/rundll32 (date of access: 23.03.2025).
10. Windows Forms for .NET documentation. *Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career*. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/winforms/?view=netdesktop-9.0 (date of access: 23.03.2025).

References:

1. Bulatetskyi, V. V., Bulatetska, L. V., & Pruts, E. S. (2018). Metody ta zasoby vyvil'nennya prostoru systemnoho rozdilu OS Microsoft Windows 10. *Komp'yuterno-integrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, (32), 85–89.
2. Bulatetskyi, V., Bulatetska, L., & Hryshanovych, T. (2022). ANALYSIS OF OS WINDOWS 10 FILE OBJECTS FOR SYSTEM PARTITION SPACE CLEANING AND OPTIMIZATION. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, *3*(15), 71–84. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.15.7184
3. Research methods and tools for cleaning the system partition of Windows operating systems / A. P. Stupin, V. V. Bulatetskyi, L. V. Bulatetska, T. O. Hryshanovych, Yu. S. Pavlenko. *Computer Science & Software Engineering (CSSE-SUT 2021)* : Proceedings of the 4th Workshop for Young Scientists. Kryvyi Rih, 18 December 2021. 2022. P. 135–145. URL: http://ceur-ws.org/Vol-3077/paper17.pdf.

4 DISM Image Management Command-Line Options (b. d.). Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. https://learn.microsoft.com/en-us/windows-hardware/manufacture/desktop/dism-image-management-command-line-options-s14?view=windows-11

5. *Tricks to Free Space on System Partition on Your PC*. (b. d.). AOMEI Partition Assistant | Partition Manager Software for Windows PC and Server. https://www.diskpart.com/articles/free-space-on-system-partition-7201.html

6. *cmd*. (b. d.). Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/windows-commands/cmd

7. *What is PowerShell? - PowerShell*. (b. d.). Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. https://docs.microsoft.com/en-us/powershell/scripting/overview?view=powershell-7.1

8. *How to add, modify, or delete registry subkeys and values by using a .reg file - Microsoft Support*. (b. d.). Microsoft Support. https://support.microsoft.com/en-us/topic/how-to-add-modify-or-delete-registry-subkeys-and-values-by-using-a-reg-file-9c7f37cf-a5e9-e1cd-c4fa-2a26218a1a23

9 *rundll32*. (b. d.). Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. https://learn.microsoft.com/en-us/windows-server/administration/windows-commands/rundll32

10. *Windows Forms for .NET documentation*. (b. d.). Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/winforms/?view=netdesktop-9.0

DOI https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-09
УДК 004.94
Газдюк Катерина Петрівна, Phd, доцент
https://orcid.org/0000-0002-7568-4422
Срібний Олександр Ігорович, аспірант
https://orcid.org/0009-0009-3366-8237
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

РОЗРОБКА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПОШИРЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

Газдюк К. П. Срібний О. І. Розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. *У статті представлено підхід до моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань за допомогою багатопараметричної мультиагентної системи, яка враховує як біологічні, так і соціальні фактори. Метою дослідження є створення гнучкої моделі, що дозволяє аналізувати епідеміологічні процеси в умовах урбанізованого середовища та оцінювати ефективність різних сценаріїв втручання. У межах моделі кожен агент репрезентує індивідуальну особливості з власними характеристиками, включаючи стан здоров'я, соціальну активність, маршрут пересування та поведінкові особливості. Для опису інфекційного процесу було використано адаптовану SIR-модель, інтегровану у мультиагентне середовище, що дозволяє враховувати ймовірності переходів між станами сприйнятливості, зараження та одужання, виходячи від особливостей взаємодій між агентами. У якості інструментарію реалізації обрано мову Java з використанням платформи MASON, що дозволяє створювати моделі з високим рівнем деталізації та масштабованості. Для візуалізації результатів було використано JavaFX у поєднанні з бібліотекою GeoFX, що забезпечує відображення просторової структури моделі, станів агентів та поширення інфекції у часі та просторі. Візуалізація є не лише демонстраційним елементом, а й аналітичним інструментом, що дозволяє оцінювати ефективність превентивних заходів у режимі реального часу. Результати свідчать про здатність моделі відтворювати складні патерни поширення інфекції з урахуванням нерівномірного розташування джерел інфекції. Робота демонструє потенціал мультиагентного підходу в поєднанні з геопросторовою візуалізацією як ефективного засобу підтримки рішень у сфері громадського здоров'я.*

Ключові слова: *багатопараметрична модель, мультиагентне моделювання, інфекційні захворювання, динаміка поширення, стратегії контролю.*

Hazdiuk K., Sribnyi S. Development of a multi-parameter multi-agent system for modeling the dynamics of the spread of infectious diseases. *This paper presents an approach to modeling the dynamics of infectious disease spread using a multiparameter multi-agent system that integrates both biological and social factors. The main goal of the research is to develop a flexible simulation model that enables the analysis of epidemiological processes in urban environments and the evaluation of various intervention strategies. Each agent in the model represents an individual with personalized characteristics, including health status, daily mobility, social activity, and behavioral patterns. The core infection dynamics are based on an adapted SIR model, integrated into the agent-based framework, allowing probabilistic transitions between susceptible, infected, and recovered states depending on the nature of agent interactions. The implementation was carried out using Java and the MASON simulation platform, which supports high-resolution and scalable agent-based modeling. To enable interactive spatial analysis, the visualization module was developed using JavaFX and the GeoFX library. This combination allows for the dynamic rendering of agent locations, health states, and the spatial-temporal progression of the infection. The visualization not only enhances interpretability but also serves as a real-time analytical tool for assessing the effectiveness of preventive measures and containment policies. Simulation results demonstrate the model's capacity to reflect complex patterns of infection spread, including the impact of initial infection placement and social interaction networks. The developed system shows the practical potential of combining agent-based simulation with geospatial visualization for epidemiological forecasting and decision-making in public health management.*

Keywords: *multiparametric modeling and multi-agent modeling approaches for understanding infectious disease spread dynamics and designing control strategies.*

Постановка наукової проблеми. У світі, де інфекційні захворювання є постійною загрозою здоров'ю людей, розробка ефективних стратегій контролю та прогнозування поширення цих захворювань є критично важливою. Особливо в умовах загострення пандемічних ризиків, вчені та медичні фахівці шукають нові підходи до моделювання динаміки поширення інфекцій.

У цьому контексті розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання стає актуальною. Вона спрямована на врахування різноманітних факторів, що впливають на поширення інфекційних захворювань, таких як соціальні мережі, географічні особливості, ступінь імунізації та інші. Система має на меті надати інструменти для прогнозування та управління епідеміологічною ситуацією, а також для розробки ефективних стратегій контролю за поширенням захворювань. Використання багатопараметричних та мультиагентних підходів дозволяє більш точно відтворити складні взаємодії між різними чинниками, що впливають на поширення інфекцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз існуючих систем моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань виявляє різноманітність підходів та методів, які застосовуються для прогнозування та управління епідемічними процесами.

Моделі SIR є одними з найпоширеніших та класичних підходів до моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. Вони ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь, що описують зміни в кількості осіб у трьох основних категоріях: сприйнятливих до зараження (Susceptible), інфікованих (Infectious) та одужалих чи імунізованих (Recovered).

Основною ідеєю моделі SIR [1] є те, що особи поступово переходять від категорії сприйнятливих до інфікованих після контакту з хворою особою, після чого, під впливом імунної відповіді або лікування, вони можуть одужати і стати імунізованими або вилікуваними. Ця модель дозволяє прогнозувати, як швидко може поширюватися захворювання в популяції та які частки популяції будуть інфіковані в певний момент часу. Хоча модель SIR є досить простою, вона може надати важливі відомості про епідемічний процес та допомогти в розробці стратегій контролю за поширенням інфекційних захворювань. Однак важливо враховувати, що ця модель має обмеження, такі як відсутність урахування просторових та індивідуальних варіацій, що можуть бути важливими для деяких захворювань та ситуацій.

Модель GeoCity — це агентно-орієнтована комп'ютерна модель, яка імітує функціонування міста з урахуванням демографічних, соціальних та просторово-часових характеристик його мешканців. В основі моделі лежить репрезентація кожного мешканця як окремого агента з індивідуальними параметрами — віком, станом здоров'я, щоденним розкладом (робота, навчання, відпочинок), місцем проживання та пересуванням містом. GeoCity [2] дозволяє моделювати повсякденну активність населення в межах урбаністичного середовища, враховуючи типову інфраструктуру міста: житлові райони, офіси, навчальні заклади, транспортні маршрути тощо. Завдяки цьому модель забезпечує реалістичне відтворення контактів між агентами — ключового фактора при аналізі поширення інфекційних захворювань.

Модель була спеціально адаптована для вивчення епідеміологічних процесів, зокрема поширення вірусу SARS-CoV-2. GeoCity дозволяє досліджувати вплив різних сценаріїв поведінки населення, змін у розкладі, рівня імунітету, а також структурних особливостей міського простору на динаміку епідемії. Враховуючи високу деталізацію та гнучкість, модель GeoCity є потужним інструментом для підтримки прийняття рішень у сфері громадського здоров'я та урбаністичного планування під час пандемій.

Geospatial SEIR(D)-модель [3] [4] є багаторівневою геопросторовою епідеміологічною моделлю, заснованою на багатоагентному підході з використанням безперервно-дискретних станів. Модель посуває класичну SEIR(D)-структуру (Susceptible – Exposed – Infected – Recovered – Deceased) із просторово-часовою динамікою поведінки людей, що дозволяє точно відображати процеси поширення вірусних інфекцій в урбанізованому середовищі. Кожен агент у цій моделі репрезентує індивідуальну одиницю з унікальними характеристиками, включаючи стан здоров'я, повсякденну активність, мобільність і географічну прив'язку. Модель враховує складну взаємодію між поведінковими факторами (такими як щоденні маршрути, розклад активностей) і епідеміологічними параметрами (включаючи ймовірність зараження, імунітет, тривалість інфекційних фаз). Завдяки використанню геоданих, забезпечується просторово точне відображення процесів взаємодії між агентами в межах заданого середовища, що дозволяє досліджувати вплив як індивідуальних, так і колективних стратегій на динаміку інфекції.

Розроблені алгоритми дають змогу оцінювати чисельні показники в межах моделювання: кількість осіб у різних епідеміологічних станах, зміни у просторі та часі, темпи поширення та вплив превентивних заходів. У межах проведених симуляцій модель продемонструвала здатність відображати складні нелінійні залежності між соціальною поведінкою, просторовим переміщенням агентів та динамікою захворюваності. Окремо було проаналізовано ефективність різних сценаріїв стримування, серед яких зміни у поведінці, запровадження обмежень на переміщення, а також впровадження масових профілактичних заходів. Результати показали, що поєднання поведінкових інтервенцій і стратегій управління ризиками може істотно змінити як характер поширення інфекції, так і її тривалість. Запропонована модель слугує універсальним інструментом для кількісного аналізу ефективності заходів у контексті епідеміологічного моделювання, а також для розробки оптимальних стратегій реагування у сфері громадського здоров'я.

Мультиагентні системи в останні роки отримали значний інтерес у сфері моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань. Це стало можливим завдяки їхній здатності

моделювати складні соціальні та взаємодіючі системи, такі як популяції людей, з урахуванням індивідуальних властивостей та поведінки кожного агента. У мультиагентних системах [5] [6] кожен індивідуальний агент може мати власні характеристики, такі як ступінь вразливості до зараження, інфекційний статус та стратегії поведінки. Це дозволяє краще відтворювати складні взаємодії між особами та їхні вплив на динаміку поширення захворювань

Однією з переваг використання мультиагентних систем є їхня здатність моделювати різноманітні сценарії та стратегії контролю за поширенням захворювань. Наприклад, вони можуть допомогти в оцінці ефективності різних методів соціального дистанціювання, вакцинації та ізоляції, а також визначенні найефективніших шляхів боротьби з епідеміями та пандеміями. Застосування мультиагентних [7] [8] систем в моделюванні динаміки поширення інфекційних захворювань відкриває нові можливості для дослідження та прогнозування епідеміологічних ситуацій, що може призвести до покращення стратегій контролю та запобігання захворюванням

Методи машинного навчання, зокрема нейронні мережі та класифікація, стали важливим інструментом для аналізу та прогнозування динаміки епідемій. Вони відкривають можливості для розвитку нових підходів у галузі епідеміології та пандеміології, дозволяючи ефективно аналізувати великі обсяги даних та виявляти складні закономірності в поширенні захворювань.

Нейронні мережі можуть бути навчені на основі історичних даних про епідеміологічні випадки, щоб передбачити майбутні тенденції поширення захворювань. Вони можуть враховувати різноманітні фактори, такі як густота населення, рівень вакцинації, мобільність населення та інші, що допомагає у точному прогнозуванні епідеміологічних ситуацій. Класифікаційні моделі [9] [10] також можуть бути корисні для ідентифікації ризикових груп населення, аналізу ефективності заходів контролю за епідемією та визначення оптимальних стратегій запобігання зараження. Вони допомагають враховувати різні сценарії та прогнозувати можливі наслідки введення різних заходів управління епідемічною ситуацією.

Застосування методів машинного навчання у галузі епідеміології відкриває широкі перспективи для розвитку інноваційних підходів до контролю та запобігання поширенню захворювань. Вони допомагають швидше виявляти важливі тренди та реагувати на них, що може значно покращити ефективність стратегій боротьби з епідеміями та пандеміями.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у розвитку класичних епідеміологічних моделей, таких як SIR та SEIR, їхня здатність точно відтворювати реальні епідемічні процеси залишається обмеженою. Ці моделі не враховують просторову неоднорідність, індивідуальні особливості поведінки населення, взаємодію між окремими соціальними групами, а також динамічні зміни умов зовнішнього середовища. Також обмеженою є здатність класичних моделей до адаптації в реальному часі на основі нових даних, що особливо актуально в умовах стрімкого поширення інфекцій, таких як COVID-19.

Існуючі мультиагентні системи та геопросторові моделі частково усувають ці недоліки, проте часто залишаються надмірно складними для практичного використання або не включають елементи навчання з підкріпленням для автоматичного налаштування поведінкових стратегій. Недостатньо також досліджено поєднання мультиагентного моделювання з інструментами машинного навчання для формування ефективних, адаптивних стратегій управління епідеміями. У цьому контексті актуальним стає завдання створення гнучкої багатопараметричної мультиагентної моделі, здатної відображати динаміку захворювання з високим рівнем деталізації та пристосовності до реальних умов

Загальною метою дослідження є розробка багатопараметричної мультиагентної системи моделювання поширення інфекційних захворювань, яка здатна враховувати широкий спектр факторів, що впливають на епідемічну динаміку. Система покликана поєднати можливості класичних епідеміологічних моделей (таких як SIR/SEIR) із гнучкістю агентно-орієнтованого підходу, що дозволяє моделювати індивідуальні особливості поведінки, соціальні взаємодії, мобільність, просторову неоднорідність та рівень імунізації населення. Використання багатьох параметрів дозволяє детальніше відобразити складні процеси взаємодії в межах популяції та їхній вплив на темпи поширення інфекції. Такий підхід спрямований на створення інструменту, який забезпечує більш реалістичне та точне прогнозування розвитку епідемії. А також створення функціональної моделі, здатної підтримувати ухвалення рішень у сфері громадського здоров'я за рахунок моделювання різних сценаріїв стримування захворювання, таких як соціальне

дистанціювання, вакцинація, локдауни та інші профілактичні заходи. У рамках розробленої системи передбачається також застосування методів машинного навчання для покращення адаптивності та точності прогнозування. В результаті реалізована система може бути ефективним інструментом як для дослідницьких завдань, так і для практичного використання органами управління у кризових ситуаціях.

Виклад основного матеріалу. Для ефективної реалізації мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань необхідно обґрунтовано підійти до вибору відповідних технологій та методів. Обрані інструменти мають забезпечувати гнучкість, масштабованість, інтеграцію з методами машинного навчання та підтримку візуалізації результатів моделювання. У цьому розділі розглянуто критерії вибору технологій, обґрунтовано використання певних програмних засобів, середовищ розробки та методологій, а також описано їхню доцільність у контексті поставлених завдань дослідження.

Таблиця 1 надає огляд трьох основних засобів для розробки багатопараметричної мультиагентної системи моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань разом із їх перевагами та недоліками. Вибір конкретного інструменту буде залежати від потреб дослідження, експертизи команди розробників та наявних ресурсів.

Таблиця 1. Огляд основних засобів розробки

Варіант	Опис	Переваги	Недоліки
Java з використанням бібліотек, таких як Deeplearning4j або Weka	Java — мова програмування, що має широке застосування в розробці програмного забезпечення. Deeplearning4j і Weka — це бібліотеки машинного навчання та імітаційних моделей для Java.	Можливість використання Java для розробки великих та масштабованих систем. Широкий вибір бібліотек для машинного навчання та імітаційних моделей.	Java може бути менш зручною у використанні для деяких дослідників порівняно з Python. Обмежена кількість спеціалізованих бібліотек порівняно з Python.
NetLogo	NetLogo — спеціалізована платформа для моделювання агентів, яка має графічний інтерфейс та простий мову програмування. Вона призначена для створення складних мультиагентних систем.	Простий у використанні та має графічний інтерфейс. Оптимізований для моделювання агентів та інтерактивної візуалізації.	Обмежений у функціональності порівняно з загальністю мов програмування.
MATLAB	MATLAB — інтерактивна середовище для чисельних розрахунків, яка має вбудовані функції для розв'язування диференціальних рівнянь та моделювання агентів.	Вбудована підтримка чисельних методів та статистичних аналізів. Простий синтаксис та багато готових функцій.	Комерційна ліцензія може бути дорогою для деяких дослідників. Менша спільнота користувачів порівняно з вільно розповсюджуваними мовами програмування.

Визначення вимог і архітектурне проектування. На етапі визначення вимог та архітектурного проєктування формуються ключові параметри мультиагентної системи та її

структурна організація. Насамперед, окреслюються характеристики агентів – індивідуалізованих одиниць моделювання, які можуть бути наділені такими властивостями, як вік, стать, імунологічний статус, тип соціальної активності, а також епідеміологічний стан (сприйнятливий, інфікований, одужалий, померлий).

Особливу увагу приділено моделюванню міжагентної взаємодії, яка реалізується залежно від типології контактів (сімейні, професійні, випадкові) та характеристик середовища. Використання графових структур забезпечує відтворення складної мережі соціальних зв'язків між агентами. Параметризація процесів передачі захворювання включає визначення інкубаційного періоду, рівня контагіозності, тривалості хвороби та ймовірності розвитку ускладнень. Важливо, щоб модель залишалась гнучкою та адаптивною для імітації різноманітних сценаріїв.

Архітектурна структура системи складається з низки функціональних модулів, зокрема: модуля генерації агентів, модуля міжагентної взаємодії, модуля передачі інфекції, модуля реалізації інтервенцій (вакцинація, карантинні заходи), а також модуля візуалізації даних та збору статистичних показників. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну, масштабовану модель, придатну як для наукових досліджень, так і для прийняття рішень у сфері епідеміологічного прогнозування та управління ризиками.

Для розробки було обрано бібліотеку MASON, яка реалізована на мові програмування Java. MASON є потужною платформою для моделювання складних мультиагентних систем, що дає змогу створювати моделі з високим рівнем деталізації агентів і їх взаємодії. Бібліотека підтримує як дискретно-часові, так і безперервні моделі, що дозволяє враховувати складні динамічні процеси, такі як поширення інфекцій чи соціальна взаємодія. Однією з основних переваг MASON є її гнучкість і можливість інтеграції з іншими інструментами Java, що забезпечує ефективну обробку даних і використання бібліотек для машинного навчання. Вбудовані компоненти для візуалізації дозволяють створювати графічні інтерфейси для відображення результатів моделювання, що особливо корисно при аналізі результатів великих симуляцій.

MASON також має активну спільноту користувачів, що сприяє постійному розвитку та вдосконаленню бібліотеки. Її відкритий вихідний код і можливість налаштування під конкретні задачі роблять її підходящою для моделювання складних процесів, таких як поширення інфекційних захворювань, адаптивні політики втручання або соціальні динаміки.

Реалізація моделі агентів передбачає створення окремих агентів, кожен з яких представляє індивідуального члена популяції з різними характеристиками, такими як вік, стать, стан здоров'я та інші біологічні чи соціальні фактори. Агенти мають свою поведінку та здійснюють взаємодії з іншими агентами в рамках моделювання поширення інфекційних захворювань. Ці взаємодії можуть включати передачу інфекції, яка залежить від численних факторів: ймовірності зараження, типу контакту (наприклад, безпосередній контакт чи через середовище), тривалості та інтенсивності взаємодії, а також від соціальних і поведінкових аспектів, таких як дотримання карантинних заходів чи носіння масок.

Моделювання агентів включає програмування механізмів, які дозволяють агентам приймати рішення на основі поточного стану їхніх параметрів (наприклад, стан здоров'я) і взаємодії з іншими агентами. Такі взаємодії можуть призводити до зміни стану агента, наприклад, до зараження або одужання, залежно від розроблених правил і ймовірностей, що відображають реальні процеси поширення захворювання.

Завдяки такій моделі можна виявляти і досліджувати механізми поширення інфекцій в популяції, оцінювати ефективність різних заходів боротьби з епідемією та прогнозувати динаміку розвитку інфекційної хвороби в реальному часі, враховуючи індивідуальні характеристики та взаємодії агентів.

Інтеграція з моделлю поширення інфекцій. Для моделювання поширення інфекцій в обраній мультиагентній системі було вибрано математичну модель SIR (вразливість, інфікованість, вилікування). Ця модель дозволяє ефективно відтворювати динаміку епідемії серед агентів, де кожен агент може перебувати в одному з трьох станів: вразливий (S), інфікований (I) або вилікуваний (R).

Інтеграція моделі SIR у мультиагентну систему здійснюється шляхом визначення ймовірностей переходів між цими станами залежно від взаємодій між агентами, таких як контакти, передачі інфекції, та інші фактори, які впливають на швидкість зараження та вилікування. Цей підхід дозволяє моделювати не лише поширення інфекції, але й враховувати вплив таких параметрів, як соціальні контакти, карантинні заходи та швидкість реакції на епідемію.

Для створення **інтерактивної візуалізації** було обрано мову програмування Java з використанням JavaFX у поєднанні з бібліотекою GeoFX. Це рішення обумовлене потребою у динамічному, графічному відображенні процесів, що відбуваються у системі, зокрема переміщенні агентів, зміні їхніх статусів та просторовому поширенні інфекції. JavaFX забезпечує можливість створення гнучкого та масштабованого графічного інтерфейсу, а GeoFX дозволяє ефективно працювати з геопросторовими даними, включаючи відображення координат, накладення шарів і результатів моделювання, а також інтеграцію з зовнішніми джерелами картографічної інформації.

Візуалізація відіграє не лише демонстраційну функцію, але й є інструментом аналітики: за допомогою карти можна відстежувати часову динаміку поширення захворювання, виділяти зони з підвищеним ризиком, оцінювати ефективність запроваджених заходів впливу, таких як соціальне дистанціювання чи вакцинація. Таким чином, вибір JavaFX з GeoFX дозволяє поєднати точність просторової моделі з можливістю наочного представлення її результатів, що суттєво розширює потенціал системи для дослідження та прийняття управлінських рішень.

Розглянемо гіпотетичний сценарій поширення інфекційного захворювання в умовах середнього за розміром міського середовища. На рисунку 1 подано модель просторового розміщення агентів (домогосподарств), де центральний червоний маркер представляє "нульового пацієнта", з якого починається інфекція, зелені — здорові агенти. Ця модель дозволяє проаналізувати характер поширення захворювання залежно від щільності населення та просторової структури контактів.

Рис. 1. Ознаймлює захворювання в центральній області

На рис 2 спостерігається формування локалізованого епідемічного осередку в центральній частині міста, де зафіксовано високу концентрацію інфікованих осіб. Така ситуація характерна для середовищ із щільною забудовою та інтенсивною соціальною взаємодією, що сприяє швидкій трансмісії інфекції. У моделюванні враховано як прямі контакти між агентами, так і фактори просторової близькості, що посилює ефект кластера.

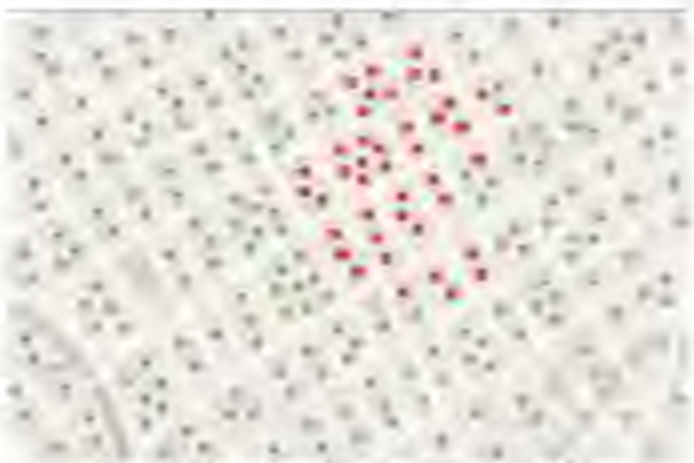


Рис. 2. Проміжна фаза поширення інфекції.

Інший сценарій — коли "нульовий пацієнт" знаходиться не в центрі, а ближче до одного з країв регіону (Рис.3).

Рис. 3. Одиничне зараження в центральній області

Зараження починається з правого боку карти і поступово поширюється вглиб середовища. Такий сценарій є особливо важливим для досліджень, де джерело інфекції може бути занесене із зовнішнього середовища. Він дозволяє оцінити асиметричність розповсюдження та потенційний вплив локалізованих заходів контролю. На рис 4 зображено модель саме такого сценарію.

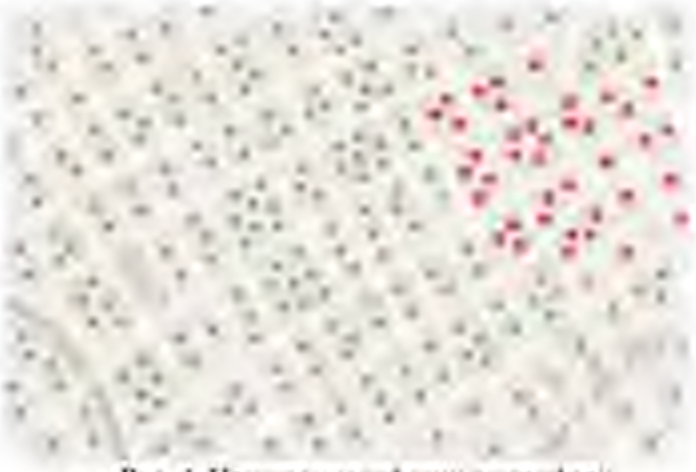


Рис. 4. Поширення інфекції з периферії.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній роботі було розроблено багатопараметричну мультиагентну систему моделювання динаміки поширення інфекційних захворювань, яка поєднує класичні епідеміологічні підходи з гнучкістю агентно-орієнтованого моделювання. Запропонована система дозволяє враховувати індивідуальні властивості агентів, їхню мобільність, соціальну поведінку та геопросторовий контекст, що суттєво підвищує точність і реалістичність моделювання. Інтеграція адаптованої SIR-моделі до мультиагентної архітектури дала змогу ефективно описувати процеси зараження, одужання та формування імунітету на рівні окремих агентів. Використання JavaFX та бібліотеки GeoFX забезпечило створення візуалізаційного модуля, який дозволяє наочно аналізувати поширення інфекції у просторі й часі, ідентифікувати критичні зони та досліджувати динаміку під впливом різних сценаріїв втручання.

Проведені симуляційні експерименти підтвердили здатність моделі точно відображати як централізовані, так і периферійні сценарії початку інфекції, а також їхній вплив на загальну динаміку епідемії. Модель демонструє потенціал як інструмент дослідження складних епідеміологічних ситуацій, так і як платформа для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері охорони громадського здоров'я. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення функціональності моделі, включаючи адаптивне навчання агентів, інтеграцію реальних

демографічних та мобільних даних, а також впровадження додаткових типів інтервенцій, таких як вакцинація або тестування з ізоляцією.

Список бібліографічного опису

1. Bildirir, A., Bildirir, C., Gursha, M., Ivanovic, M., & Papryzki, M. "Multi-Agent Simulation of Core Spatial SIR Models for Epidemics Spread in a Population." 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, 2020. [Online] Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9358263
2. Yaroslav Vyklyuk, Denys Nevinskyi, Valentyna Chopyak, Olga Golubovska, Miroslav Skoda, Kateryna Hordiak. Modeling the spatial distribution of different strains of the COVID-19 virus based on the GeoSIR(D) model. Viruses. 2023. No 15(12). 2299. https://doi.org/10.3390/v15122299
3. Liu et al. Modeling COVID-19 spread using multi-agent simulation with small-world network approach. BMC Public Health. 2024 24:672. https://doi.org/10.1186/s12889-024-18157-x
4. Walsh Medical Media. Comparing Decision Tree-Based Ensemble Machine Learning Models for COVID-19 Death Probability Profiling. Journal of Health & Medical Informatics. https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/comparing-decision-tree-based-ensemble-machine-learning-models-for-covid19-death-probability-profiling-2329-6488.1000320.html
5. Savarimuthu, B.T.R., & Cranefield, S. "Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems." Multiagent and Grid Systems, vol. 7, no. 1, pp. 21-54, 2011. [Online] Available: https://content.iospress.com/articles/multiagent-and-grid-systems/mgs00167
6. Roche, B., Guégan, J.-F., & Bousquet, F. "Multi-agent systems in epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission." BMC Bioinformatics, vol. 9, 2008, p. 435. [Online] Available: https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2105-9-435
7. Wang, Y., Ishii, H., Bonnet, F., & Défago, X. "Resilient Consensus for Multi-Agent Systems Under Adversarial Spreading Processes." IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 9780222, Sept.-Oct. 2022. [Online] Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9780222
8. Belkina, N., Bozzi, F., & Chaplain, M.A.J. "A multi-agent approach to the impact of epidemic spreading on commercial activities." Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 32, no. 10, pp. 1931-1948, 2022. [Online] Available: https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218202522501440
9. Bildirir, A., Bildirir, C., Gursha, M., Ivanovic, M., & Papryzki, M. "Multi-agent Spatial SIR-based Modeling and Simulation of Infection Spread Management." Lecture Notes in Computer Science, vol. 12744, pp. 37-47, 2021. [Online] Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77967-2_37
10. Tian, C., Ding, W., & Cao, R. "Extensive Epidemic Spreading Model Based on Multi-agent System Framework." Lecture Notes in Computer Science, vol. 4480, pp. 17-28, 2021. [Online] Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72590-9_13

References:

1. Bildirir, A., Bildirir, C., Gursha, M., Ivanovic, M., & Papryzki, M. "Multi-Agent Simulation of Core Spatial SIR Models for Epidemics Spread in a Population." 2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, 2020. [Online] Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9358263
2. Yaroslav Vyklyuk, Denys Nevinskyi, Valentyna Chopyak, Olga Golubovska, Miroslav Skoda, Kateryna Hordiak. Modeling the spatial distribution of different strains of the COVID-19 virus based on the GeoSIR(D) model. Viruses. 2023. No 15(12). 2299. https://doi.org/10.3390/v15122299
3. Liu et al. Modeling COVID-19 spread using multi-agent simulation with small-world network approach. BMC Public Health. 2024 24:672. https://doi.org/10.1186/s12889-024-18157-x
4. Walsh Medical Media. Comparing Decision Tree-Based Ensemble Machine Learning Models for COVID-19 Death Probability Profiling. Journal of Health & Medical Informatics. https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/comparing-decision-tree-based-ensemble-machine-learning-models-for-covid19-death-probability-profiling-2329-6488.1000320.html
5. Savarimuthu, B.T.R., & Cranefield, S. "Norm creation, spreading and emergence: A survey of simulation models of norms in multi-agent systems." Multiagent and Grid Systems, vol. 7, no. 1, pp. 21-54, 2011. [Online] Available: https://content.iospress.com/articles/multiagent-and-grid-systems/mgs00167
6. Roche, B., Guégan, J.-F., & Bousquet, F. "Multi-agent systems in epidemiology: a first step for computational biology in the study of vector-borne disease transmission." BMC Bioinformatics, vol. 9, 2008, p. 435. [Online] Available: https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2105-9-435
7. Wang, Y., Ishii, H., Bonnet, F., & Défago, X. "Resilient Consensus for Multi-Agent Systems Under Adversarial Spreading Processes." IEEE Transactions on Network Science and Engineering, vol. 9, no. 5, pp. 9780222, Sept.-Oct. 2022. [Online] Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9780222
8. Belkina, N., Bozzi, F., & Chaplain, M.A.J. "A multi-agent approach to the impact of epidemic spreading on commercial activities." Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, vol. 32, no. 10, pp. 1931-1948, 2022. [Online] Available: https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218202522501440
9. Bildirir, A., Bildirir, C., Gursha, M., Ivanovic, M., & Papryzki, M. "Multi-agent Spatial SIR-based Modeling and Simulation of Infection Spread Management." Lecture Notes in Computer Science, vol. 12744, pp. 37-47, 2021. [Online] Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-77967-2_37
10. Tian, C., Ding, W., & Cao, R. "Extensive Epidemic Spreading Model Based on Multi-agent System Framework." Lecture Notes in Computer Science, vol. 4480, pp. 17-28, 2021. [Online] Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-72590-9_13

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-10
УДК 004.42:519.86
Гересь Вадим Віталійович, магістр
Кошелюк Віктор Андрійович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4336-9087
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ВЕБ-ТЕХНОЛОГІЙ У ДІАГНОСТИЦІ ТА ПРОФІЛАКТИЦІ МЕНТАЛЬНИХ РОЗЛАДІВ

Гересь В. В., Кошелюк В. А. Використання веб-технологій у діагностиці та профілактиці ментальних розладів. У статті розглядається актуальність використання веб-технологій у діагностиці, профілактиці та підтримці ментального здоров'я населення в умовах зростаючого психоемоційного навантаження, економічної нестабільності та воєнних дій, що впливають на психіку населення. Особливий акцент зроблено на необхідності розробки інноваційних цифрових рішень, здатних ефективно адаптуватися до індивідуальних потреб різних соціальних груп, таких як ветерани, молодь, педагогічні працівники, внутрішньо переміщені особи, люди з інвалідністю. У статті наведено сучасні підходи до впровадження веб-технологій у сферу психічного здоров'я, зокрема використання емоційного дизайну, гейміфікації, адаптивних інтерфейсів, штучного інтелекту, інструментів самоспостереження та самоаналізу. Окрема увага приділяється питанням захисту конфіденційної інформації, безпеки персональних даних, цифрової етики та прозорості алгоритмів, що працюють з чутливими психологічними станами користувачів. Розглянуто важливість доступності веб-сервісів для людей з різними можливостями. У статті також огляд як міжнародних, так і українських цифрових ініціатив: серед них — мобільні застосунки для самодопомоги, онлайн-платформи для терапевтичної підтримки, чат-боти, системи емоційного моніторингу тощо. Підкреслюється необхідність міждисциплінарного підходу, що поєднує технічні, психологічні та соціальні складові для створення ефективних, сучасних та довготривалих рішень у сфері ментального здоров'я.

Ключові слова: ментальне здоров'я, веб-технології, емоційний моніторинг, цифрова психіатрія, гейміфікація, штучний інтелект.

Gerzel V., Koshelnik V. Use of web-technologies in diagnostics and prevention of mental disorders. The article discusses the relevance of using web technologies in the diagnosis, prevention, and support of mental health in the context of growing psycho-emotional stress, economic instability, and military actions that affect the psyche of the population. Particular emphasis is placed on the need to develop innovative digital solutions that can effectively adapt to the individual needs of different social groups, such as veterans, young people, teachers, internally displaced persons, and people with disabilities. The article describes modern approaches to the implementation of web technologies in the field of mental health, in particular the use of emotional design, gamification, adaptive interfaces, artificial intelligence, self-observation and self-reflection tools. Special attention is paid to issues of confidential information protection, personal data security, digital ethics, and transparency of algorithms that work with sensitive psychological states of users. The importance of web service accessibility for people with different abilities is considered. The article provides an overview of both international and Ukrainian digital initiatives, including mobile self-help applications, online platforms for therapeutic support, chatbots, emotional monitoring systems, and more. The need for an interdisciplinary approach that combines technical, psychological, and social components to create effective, ethical, and long-lasting solutions in the field of mental health is emphasized.

Keywords: mental health, web technologies, emotional monitoring, digital psychotherapy, gamification, artificial intelligence.

Постановка проблеми. Ментальне здоров'я є невід'ємною складовою загального добробуту людини та значною мірою впливає на її здатність соціально адаптуватися, навчатися, працювати та реалізовувати свій потенціал. Особливої актуальності ця проблема набула в умовах повномасштабної війни в Україні, що призвела до різкого зростання попиту на психологічну допомогу. За оцінками фахівців Міністерства охорони здоров'я України, близько 15 мільйонів українців потребують тієї чи іншої форми підтримки психічного здоров'я, серед яких – діти, літні люди, ветерани та військові [1].

Незважаючи на критичну ситуацію, діюча система надання допомоги не завжди відповідає сучасним викликам. Особливо гостро є проблема відсутності ефективних інструментів для постійного моніторингу ментального стану людини. Традиційні методи (психологічні консультації, анкетування, самооцінка) не забезпечують оперативного реагування на кризові ситуації. Це може призводити до ускладнення психічних станів, особливо в умовах високого стресу та невизначеності, які сьогодні переживають мільйони українців [2].

Сучасні цифрові технології відкривають нові можливості у сфері психічного здоров'я – зокрема створення веб-платформ для моніторингу емоційного стану у режимі реального часу. Проте виникають запитання щодо конфіденційності, безпеки та адаптації таких систем під потреби як користувачів, так і фахівців [2]. Тому на сьогодні актуальним є дослідження та впровадження

сучасних технологічних рішень, які дозволять ефективно підтримувати ментальне здоров'я населення, особливо у кризових обставинах.

Аналіз актуальних досліджень та публікацій. В рамках дослідження важливо звернути увагу на існуючі наукові праці в обраній предметній області — застосування веб-технологій для моніторингу та підтримки ментального здоров'я. Так, у роботі І. Петрової [3] розглядається використання мобільних додатків для самостійної оцінки психологічного стану користувачів. Авторка аналізує різні методики, зокрема застосування опитувальників та аналіз мовлення, для визначення рівня тривожності та депресії. Хоча ці праці зосереджені на мобільних платформах, її ідеї та підходи перекликаються з концепцією створення веб-застосунків для постійного моніторингу ментального стану.

Ще один важливий внесок зробили дослідники В. Литвиненко та А. Гуменюк [4], які досліджували застосування систем штучного інтелекту для аналізу даних, зібраних через онлайн-сервіси для психічного здоров'я. Вони продемонстрували, що автоматизовані системи здатні не лише виявляти ознаки кризових станів, але й прогнозувати можливе погіршення стану пацієнта у режимі реального часу. Це підтверджує перспективність інтеграції сучасних технологій у системи моніторингу ментального здоров'я, що є ключовою ідеєю і нашого дослідження.

Крім того, слід згадати роботу М. Коваленко та колег [5], які провели аналіз існуючих веб-платформ для психологічної підтримки та моніторингу. Вони виявили, що більшість систем недостатньо враховують питання конфіденційності та безпеки даних користувачів, що є однією з головних перешкод їх широкого впровадження. Їхні висновки підкреслюють важливість розробки захищених і зручних інтерфейсів, що актуально і для нашого дослідження.

Отже, сучасні дослідження у цій галузі свідчать про великі можливості застосування веб-технологій і штучного інтелекту для ефективного моніторингу та підтримки ментального здоров'я. Водночас, вони окреслюють низку викликів, зокрема у галузі безпеки даних і функціональності систем, що визначає шлях і напрями нашого дослідження.

Метою роботи обґрунтування концепції веб-технологій для моніторингу ментального здоров'я, а також створення прототипу системи, що забезпечує збір, аналіз і візуалізацію даних у реальному часі з урахуванням аспектів безпеки та зручності для користувачів.

Виклад основного матеріалу. З урахуванням виявлених викликів і потреб, актуально розглядати архітектуру веб-технологій, орієнтованих на психоемоційну підтримку. На практиці такі платформи включають цілий комплекс функціональних блоків: від самодіагностики та емоційного моніторингу до залучення штучного інтелекту для аналізу поведінкових патернів. Одним із ключових завдань таких систем є не лише виявлення кризових станів, а й формування механізмів превентивної допомоги. Схематично структуру цифрової взаємодії між користувачем, платформою та фахівцем можна представити наступним чином:

Рис. 1. Схема цифрової взаємодії

Перед розробкою веб-технологій для моніторингу ментального здоров'я важливо враховувати психологічні механізми, що визначають поведінку користувачів у цифровому просторі, зокрема автоматичні процеси, які формують їх реакції та звички. Людина часто не усвідомлює своїх емоційних станів і внутрішніх думок, тому при створенні інтерфейсів потрібно прагнути до того, щоб взаємодія була максимально інтуїтивною і ненав'язливою. Наприклад, застосування елементів емоційного дизайну, таких як м'які кольори або підтримуюча мова, може знизити рівень тривожності й зробити процес самодіагностики більш комфортним. Це важливо, оскільки психологічні дослідження показують, що позитивний досвід користувача стимулює формування нових звичок та збільшує ймовірність регулярного використання сервісів для моніторингу настрою [6].

Крім того, мотивація користувачів грає ключову роль у довгостроковій їхній залученості. Теорії самовизначення підкреслюють, що внутрішня мотивація, яка базується на особистісних цінностях і бажанні покращити своє психологічне самопочуття, є більш стабільною і ефективною, ніж зовнішні нагороди. Враховуючи це, розробники прагнуть створювати системи, що підтримують саморефлексію та особистісний розвиток, використовуючи елементи геймфікації, такі як бали або досягнення, що стимулюють повторюваність дій і формують автоматизм у поведінці користувачів.

Ще одним аспектом є забезпечення конфіденційності та емоційної безпеки. Відсутність довіри до збереження особистих даних може значно знизити активність користувачів або викликати додатковий стрес. Тому важливо застосовувати сучасні протоколи шифрування, а також створювати інтуїтивно зрозумілі інтерфейси, які враховують психологічні особливості різних груп. Це допомагає зменшити бар'єри у використанні сервісу та сприяє більш відкритому діалогу з користувачем щодо його стану без страху бути неправильно зрозумілим або порушеним [7].

Однак не менш важливо враховувати сучасну ситуацію в Україні, де проблема ментального здоров'я загострилася внаслідок тривалих криз — пандемії COVID-19, війни, економічної нестабільності. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, 68% українців повідомили про погіршення загального стану здоров'я у порівнянні з довоєнним періодом, з них 46% страждають від психічних розладів, спричинених війною [8].

У 2023 році сімейні лікарі отримали 135 тисяч скарг на проблеми з ментальним здоров'ям, причому понад 72 тисячі з них надійшли від жінок і 18 тисяч — від дітей [9]. Дослідження Gradus Research показало, що 58% українців відчувають тривожність і напругу, 50% — проблеми зі сном, 49% — виснаженість і пригнічений настрій [10].

Ці дані підкреслюють нагальну потребу у впровадженні ефективних, зручних і психологічно безпечних веб-технологій для моніторингу ментального здоров'я. Такі сервіси можуть не лише допомагати у вчасному виявленні симптомів психоемоційного вигорання чи депресії, а й сприяти зниженню стигми, розвитку культури психогігієни та формуванню сталих звичок самодопомоги.

Одним із перспективних напрямів цифрової трансформації є адаптація технологій до потреб окремих категорій користувачів — ветеранів, освітян, молоді, біженців та осіб з інвалідністю. Успішні приклади впровадження веб-технологій в Україні й за кордоном свідчать про високу ефективність поєднання онлайн-інструментів, штучного інтелекту та індивідуалізованого підходу до психологічної підтримки. Зокрема, фахівці все частіше застосовують віртуальних терапевтів, чат-боти та геймфіковані програми для підвищення емоційної стійкості.

– Woebot (США) – віртуальний терапевт на основі когнітивно-поведінкової терапії, що пропонує підтримку в діалоговому режимі. Показав зниження рівня депресії через 2 тижні використання.

Wysa (Велика Британія) – застосунок з інтеграцією AI та вправами на основі КПТ і майндфулнесу, орієнтований на молодь і корпоративних клієнтів.

«Ти як?» (Україна) – онлайн-платформа з добіркою інструментів для самодопомоги, створена за підтримки ЮНІСЕФ.

– «Розкажи мені» (Україна) – проєкт безкоштовної онлайн-психотерапії для людей, що постраждали від війни.

– VR-проєкти для ветеранів (Україна) – симулятивні середовища для роботи з ПТСР, що розробляються у співпраці з Мінцифрою та неурядовими організаціями.

– Едпанія – освітня ініціатива з емоційної підтримки школярів і педагогів через цифрові сервіси.

Replika AI-компаньйон, що підтримує діалог і надає емоційну підтримку користувачам у форматі щоденних розмов.

Таблиця 1. Статистика щодо ментального здоров'я українців.

Показник	Показник
Частка українців, які повідомили про погіршення стану здоров'я	68%
Частка тих, хто страждає на психічні розлади, спричинені війною	46%
Кількість скарг на ментальні проблеми у 2023 році	135,000
Частка людей з тривожністю та напругою	58%
Частка людей з порушеннями сну	50%
Частка людей з виснаженістю та поганим настроєм	49%

У відповідь на зростаючу потребу в емоційній підтримці, веб-технології стають важливим інструментом для трансформації системи психічного здоров'я. Вони охоплюють не лише базову онлайн-терапію, а й інноваційні методи самодопомоги, захищені цифрові сервіси для вразливих груп, VR-рішення та інтерактивні освітні платформи.

Значна роль у цьому процесі належить українському досвіду — як державним ініціативам, так і громадським технологічним проєктам. Успішні приклади охоплюють мобільні додатки для моніторингу настрою, шкільні програми з емоційного самоспостереження, цифрову підтримку освітян та портали з психоосвіти.

Таблиця 2. Використання веб-технологій у сфері ментального здоров'я

Аспект	Статичні дані	Вплив веб-технологій
Збільшення онлайн-сеансів	Онлайн-консультації з психологами у 2020-2021 роках зросли приблизно на 100% порівняно з попередніми роками	Онлайн-терапія стала доступною з будь-якої точки країни, що дозволяє охопити віддалені регіони
Ефективність терапії	Близько 70% користувачів повідомили про покращення стану після 3-4 сеансів	Використання цифрових платформ сприяє швидкому початку терапії та зменшенню бар'єрів
Порівняна ефективність із очною терапією	Відповідно до досліджень, онлайн-терапія показує рівень ефективності, близький до очної	Віртуальні консультації дозволяють зекономити час і ресурси, зберігаючи якість допомоги
Зменшення стигми	За даними українських опитувань, понад 60% громадян легше звертаються за допомогою онлайн, ніж особисто	Анонімність та конфіденційність у цифрових сервісах стимулює звернення тих, хто боїться стигматизації
Підтримка дітей у кризі	В Україні понад 400 шкіл використовують цифрові інструменти для психологічної підтримки дітей, зокрема платформи Ednannia	Систематичний моніторинг емоційного стану дітей у прифронтових зонах здійснюється через мобільні додатки та онлайн-платформи
Підтримка викладачів	Впровадження цифрових ресурсів допомогло знизити вигорання серед педагогів приблизно на 40%	Онлайн-навчальні платформи забезпечують гнучкість у роботі та зменшують фізичне навантаження
Підтримка ментального здоров'я в освіті	В Україні активно розробляються VR-проєкти для роботи з ПТСР, що дозволяє глибше зануритись у терапевтичний процес	Віртуальна реальність допомагає ефективніше працювати з травмами, створюючи безпечний простір для переживань

Упродовж 2020–2021 років веб-технології суттєво трансформували сферу психологічної допомоги в Україні. Стрімке зростання онлайн-консультацій — удвічі порівняно з попередніми роками — стало відповіддю на нові виклики, відкривши доступ до психотерапії для широкого кола населення, включно з мешканцями віддалених регіонів. Цифрові платформи забезпечили не лише скорочений початок терапії, але й зменшили бар'єри звернення, зокрема соціальні стигми: понад 60% українців зазначили, що звертатися онлайн їм простіше, ніж особисто.

Онлайн-терапія продемонструвала високу ефективність: близько 70% користувачів відзначили покращення вже після кількох сеансів, а її результативність виявилася порівнянною з традиційною очною терапією. Важливим досягненням стало і розширення підтримки в освітньому середовищі — цифрові інструменти активно використовуються для моніторингу емоційного стану дітей, зокрема в прифронтових зонах, а також для профілактики професійного вигорання серед педагогів, рівень якого вдалося знизити на 40%.

Особливу увагу привертають інноваційні підходи: в Україні розробляються VR-проєкти для роботи з ПТСР, які дозволяють створити безпечне середовище для глибокого опрацювання травматичного досвіду.

Усе це свідчить про потужний потенціал цифрових технологій у сфері ментального здоров'я та створює підґрунтя для формування нових моделей психологічної допомоги в умовах цифрової епохи.

Висновки та перспективи подальшого дослідження У межах даного дослідження було окреслено ключові аспекти створення та впровадження веб-технологій для моніторингу ментального здоров'я, що особливо актуально в умовах війни та соціально-економічної нестабільності в Україні. Було виявлено, що ефективне використання цифрових сервісів у сфері психічного здоров'я залежить не лише від технічної реалізації, а й від урахування психологічних потреб користувачів, мотиваційних чинників, питань конфіденційності та інтерфейсної доступності. Системи, що пропонують елементи емоційного дизайну, гейміфікації та інструменти саморефлексії, мають потенціал стати ефективними інструментами профілактики та підтримки психоемоційного стану користувачів.

Дані, зібрані з відкритих джерел, свідчать про високий рівень запиту суспільства на подібні рішення, особливо з боку жінок, дітей, освітян та мешканців прифронтових регіонів. Водночас аналітичний огляд наявних платформ продемонстрував, що більшість із них потребують доопрацювання у сферах безпеки, персоналізації та інтеграції з сучасними системами аналітики (наприклад, на основі штучного інтелекту). Це вказує на доцільність розробки нових комплексних систем або удосконалення існуючих, із фокусом на зручність користування, збирання емоційних індикаторів у реальному часі та їхню візуалізацію.

Список бібліографічного списку

1. Міністерство охорони здоров'я України. Психічне здоров'я. – https://moz.gov.ua/uk/mental-health
2. Вінницька обласна універсальна наукова бібліотека ім. В. Стефаника. Захист ментального здоров'я – пріоритетне завдання сьогодення. – https://library.vn.ua/news-and-events/novini-bibliyoteki/zahist-mentalnogo-zdorovya-prioritetne-zavdannya-sogodennya
3. Петрова І. Використання мобільних додатків для самооцінки стану психічного здоров'я // Журнал психології та психотерапії. — 2022. — № 3. — С. 45–55.
4. Литвиненко В., Гуменюк А. Аналіз застосування систем штучного інтелекту для моніторингу психічного здоров'я // Збірник наукових праць Інституту психології. — 2021. — № 4. — С. 112–120.
5. Коваленко М., Іванов Г. Огляд веб-платформ для психологічної підтримки: безпека та конфіденційність // Вісник психології та безпеки інформаційних систем. — 2020. — № 2. — С. 78–85.
6. Грабовська О.І. Психологія дизайну інтерфейсів. – Київ: Інтерарт, 2021.
7. Андрущенко Т. Мотиваційна поведінка користувачів цифрових сервісів: психолого-педагогічний аналіз // Психологія та суспільство. – 2022.
8. Слово про Слово. Психічне здоров'я українців як проблема з ключовим здоров'ям через війну. – 10001. – https://slovoproslovo.com.ua/blog/psykhichne-zdorovya-ukraintsiv-yak-problema-z-klyuchovym-zdorovyam-cherez-viynu/
9. Українська правда. 1/3 жінок України у 2023 році зверталися зі скаргами на погане здоров'я. – https://life.pravda.com.ua/health/
10. Миколаївський обласний центр громадського здоров'я. – https://phc.mk.ua/

References

1. Ministry of Health of Ukraine. Mental health. https://moz.gov.ua/uk/mental-health
2. Vinnytsia Regional Universal Scientific Library named after V. Stefanyk. Protection of mental health is a priority task of today. https://library.vn.ua/news-and-events/novini-bibliyoteki/zahist-mentalnogo-zdorovya-prioritetne-zavdannya-sogodennya
3. Petrova I. The use of mobile applications for self-assessment of psychological state // Journal of Psychology and Psychotherapy. – 2022. – № 3. – P. 45-55.
4. Lytvynenko V., Humeniuk A. Analysis of the use of artificial intelligence systems for monitoring mental health // Collection of scientific papers of the Institute of Psychology. – 2021. – № 4. – P. 112-120.

5. Kovalenko M., colleagues. Review of web-based platforms for psychological support, security and privacy // Bulletin of Psychology and Security of Information Systems. - 2020. - No. 2. - P. 78-85.
6. Psychology of interface design. - Kyiv: Interservice, 2021.
7. Andrushchenko T. Motivational behavior of users of digital services: psychological and pedagogical analysis
8. Word about the Word. Half of Ukrainians have mental health problems because of the war - WHO. https://slovoprosvo.ua/lo/psykichne-zdorovya-ukravintsiv-vivna-vooz
9. Ukrainska Pravda. 135 thousand Ukrainians complained about mental health in 2023. https://life.pravda.com.ua/health
10. Mykolaiv Regional Public Health Center. https://oblzdrav.mk.gov.ua

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-11
УДК: 004.72.056.52:003.27:004.438
Головін Микола Борисович, к. ф.-м. н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-4516-9677
Головіна Ніна Анатоліївна, к. ф.-м. н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-1152-1536
Гузачов Дмитро Михайлович, студент
https://orcid.org/0009-0007-3281-602X
Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СТЕГАНОГРАФІЧНОГО ПРИХОВУВАННЯ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ В ГРАФІЧНОМУ ФАЙЛІ МЕТОДОМ LSB

Головін М. Б., Головіна Н. А., Гузачов Д. М. Програмна реалізація стеганографічного приховування текстової інформації в графічному файлі методом LSB. У роботі представлений код навчальної програми стеганографічного приховування текстової інформації в графічних файлах. Приховування реалізовано методом «найменшого значущого біту» (LSB) мовою Python. Програма може бути використана як для навчальних, так і прикладних цілей. При реалізації програми використана бібліотека Pillow. Це графічна бібліотека не є спеціалізованою для стеганографічних потреб. Позитивною якістю бібліотеки є можливість візуалізації механізму приховування інформації. Це важливо для навчальних потреб. Робота в межах бібліотеки Pillow дозволяє на рівні достатньо низького програмного коду побачити процеси приховування інформації на рівні бітів окремих пікселів графіки. Проведено експерименти програми з текстами різної довжини та з графічними контейнерами (фотографіями) різного типу. Експеримент показав коректне вкраплення тексту в графічний файл та відновлення вкраплених текстів з цих файлів. Дослідження порожніх і заповнених контейнерів (фотографій) не виявили відмінностей та інших про текстові вкладення. Аналіз фотографій і маніпуляцій з ними на рівні окремих бітів має також навчальну цінність в сенсі розкриття способу фізичної кодування фізичного сигналу. Оцінено дві умовності щодо способів кодування статичних зображень, рівень шуму, величину корисного фізичного сигналу та межі чутливості людського ока. Представлений код програми може бути використаний як на заняттях з криптографії, так і практичного програмування.

Ключові слова: стеганографія, захист інформації, приховування інформації, вкладення інформації в файлах, статичні зображення, фотографії, мова Python, бібліотека Pillow.

Holovin M., Holovina N., Huzachov D. Software implementation of steganographic hiding of text information in a graphic file using the LSB method. The paper presents the code of a training program for steganographic hiding of text information in graphic files. Hiding is implemented using the "least significant bit" (LSB) method in Python. The program can be used for both educational and practical purposes. The Pillow library was used to implement the program. This graphic library is not specialized for steganographic needs. A positive quality of the library is the ability to visualize the information hiding mechanism. This is interesting for educational purposes. Working within the Pillow library allows us to see the mechanism of information hiding at the bit level of individual graphics pixels at the level of a fairly concise program code. The program was tested with texts of different lengths and with graphic containers (photographs) of different types. The experiment showed the correct introduction of texts into a graphic file and the corresponding extraction of texts from these files. The study of empty and corresponding filled containers (photographs) did not reveal any differences and inspections of text bookmarks. Analysis of photographs and manipulations with them at the level of individual bits also has educational value in the sense of revealing the method of fixing the corresponding physical signal. The latter gives an idea of the methods of encoding static images, the noise level, the magnitude of the useful physical signal and the sensitivity limits of human vision. The presented program code can be used both in cryptography classes and in practical programming.

Keywords: steganography, information protection, information hiding, information hiding in files, static images, photographs, Python language, Pillow library.

Постановка наукової проблеми. Інтернет, як глобальна інформаційна мережа, робить інформацію легкою для передачі відкритими каналами зв'язку. Ця передача може здійснюватися в будь-яку точку Земної кулі. Однак, на жаль, при цьому існує широкий спектр можливостей по перехопленню повідомлень. Тому існує необхідність передачі важливої інформації в зашифрованому або прихованому вигляді, а краще і в зашифрованому і в прихованому.

Актуальними є оригінальні стеганографічні способи приховування інформації в медіа файлах. Освоєння таких освітніх компонент, як програмування, стеганографія, криптографія, має базуватись на актуальних темах. Це підвищує мотивацію здобувачів освіти до навчання. При вивченні програмування, зокрема, при освоєнні роботи з масивами, файлами, строками, цікавою є робота в напрямку кодування, шифрування та приховування інформації. З іншого боку, при вивченні фізики та стеганографії цікаво мати лаконічні, прозорі алгоритми програмних кодів механізмів впровадження акустичних та візуальних фізичних сигналів у відповідні медійні файли.

Також корисно мати прості аплікації програмних кодів механізмів кодування, шифрування та приховування інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коротка історія стеганографії, сфери її використання і її зв'язок з криптографією розглянуті в роботі [1]. У цій статті обговорюється призначення стеганографії. Пояснюється як стеганографія пов'язана з криптографією, а також з тим, для чого її можна і не можна використовувати. Крім того, демонструються деякі інструменти та програмне забезпечення, що використовуються в стеганографії. Обговорюються найпопулярніші алгоритми, задіяні у цих інструментах. Пояснюються переваги та недоліки, а також сильні та слабкі сторони використання стеганографії.

Хорошим системним виданням в області стеганографії є робота [2]. Тут розглянуті основні стеганографічні методи приховування конфіденційних даних у звукових та графічних комп'ютерних файлах, системно розглянуті проблеми стійкості, пропускної здатності та надійності каналу прихованого обміну даними. Також тут представлені і результати інформаційно-теоретичних досліджень проблем приховування інформації. Цікавою є аналітика стосовно оцінок рівня популярності стеганографії [3]. Показана перспективність цього підходу до захисту інформації. Дослідницькі роботи [4, 5], що були написані лідерами в галузі стеганографії цифрових медіа, у простому вигляді дають уявлення про останні найсучасніші тенденції цифрової стеганографії, принципи, алгоритми, фундаментальні теорії, методології практичного проектування сучасних стеганографічних засобів. Дещо відновлений і модифікований підхід до відомих способів криптографії і стеганографії, нових небезпек можна знайти в роботі [6].

Метою цієї роботи є реалізація простого програмного коду приховування текстової інформації в графічних файлах засобами бібліотеки Pillow мови Python для використання цього коду в навчальних і прикладних цілях.

Виклад основного матеріалу дослідження. У цій роботі приховування «секретного» тексту в графічному файлі (фотографії) реалізовано за допомогою популярного алгоритму **LSB** (Least Significant Bit - найменший значущий біт). «Найменший значущий біт» - це біт наймолодшого розряду у двійковому поданні числа. Суть цього стеганографічного методу полягає в заміні останніх значущих бітів байтів, контейнера (зображення чи аудіо) на біти повідомлення, що приховується. Різниця між порожнім та заповненим контейнером не повинна бути відчутна для органів сприйняття людини. Ця ідея була апробована авторами при реалізації приховування текстової інформації в звуковому файлі мовою Python за допомогою бібліотеки wav [7].

Ідея методу приховування тексту повідомлення в електронній картинці, що реалізується в цій роботі, наступна. Коди букв тексту секретного повідомлення перетворюються в бітовий масив. Далі окремі значення цього бітового масиву впроваджуються послідовно в окремі базові кольори (red, green, blue або RGB) кожного пікселя контейнеру в порядку їх слідування.

Кожен базовий колір (один з трьох) окремого пікселя кодується байтовою комірою (тобто числом в проміжку від 0 до 255). Зрозуміло, що один пікселя контейнеру може бути заповнений трьома бітами з щойно згаданого бітового текстового масиву. Враховуємо, що базових кольорів три (RGB) і ми можемо використати тільки молодший біт кожного кольору. В таблиці 1 представлено, як кодуються деякі з широко вживаних кольорів.

Таблиця 1. Коди кольорів

R	G	B	Color Name	R	G	B	Color Name
0	0	0	Black	80	208	255	Light Blue
255	255	255	White	0	32	255	Blue
224	224	224	Light Gray	96	255	128	Yellow-Green
128	128	128	Gray	0	192	0	Green
64	64	64	Dark Gray	255	224	32	Yellow
255	0	0	Red	255	160	16	Orange
255	96	208	Pink	160	128	96	Brown
160	32	255	Purple	255	208	160	Pale Pink

Графічна бібліотека Python Pillow [8] є цікавою для стеганографії. Адже, вона дає можливість отримати доступ до окремих пікселів зображення. Зокрема, бібліотека дає можливість змінювати базові кольори окремих пікселів. Зрозуміло, що ця бібліотека створювалась для роботи з графікою в мові Python, а не для стеганографії. Однак, доступ до окремих пікселів можна з успіхом використовувати для приховування інформації.

Дії формальної логіки по приховуванню інформації. Нехай, наприклад, десяткове число 130 є значенням рівня червоності кольору деякого пікселя. Двійковий код цього числа має вигляд 10000010. Найменший значущий біт дорівнює 0. При впровадженні в контейнер чергового біта з бітового текстового масиву закладки цей біт або змінюється на 1 або залишається 0. Адже алгоритм LSB замінює молодший біт кожного байта зображення одним бітом із «секретного» повідомлення.

Таблиця 2. Схема приховування даних

колір	Значення RGB суміжних пікселів								ші	254 в двійковому вигляді									Результат побітового OR								ші	Бітовий код букви N в LSB стовбці									Результат побітового AND							
R	1	0	0	0	0	0	1	0	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	=	1	0	0	0	0	0	1	0
G	1	0	0	0	0	0	1	1	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	1	=	1	0	0	0	0	0	1	1
B	1	0	0	0	0	1	0	0	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	=	1	0	0	0	0	1	0	0
R	1	0	0	0	0	1	0	1	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	=	1	0	0	0	0	1	0	0
G	1	0	0	0	0	1	1	0	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	1	=	1	0	0	0	0	1	1	1
B	1	0	0	0	0	1	1	1	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	0	1	1	0		0	0	0	0	0	0	0	1	=	1	0	0	0	0	1	1	1
R	1	0	0	0	1	0	0	0	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	1	=	1	0	0	0	1	0	0	1
G	1	0	0	0	1	0	0	1	&	1	1	1	1	1	1	1	0	=	1	0	0	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	=	1	0	0	0	1	0	0	0

Маніпуляції бітами в LSB, що показані в таблиці 2, досить прості. Однак, вони мають два етапи.

На першому етапі між кожним байтом графічного контейнера і бітовою маскою 11111110 відбувається побітова логічна дія «AND», яка в мові Python позначається «&». Вона скидає на 0 всі найменш значущі біти байтів графічного контейнеру. ***На другому етапі*** між кожним модифікованим байтом контейнеру і бітовою маскою 0000000[0/1] виконується логічна побітова операція «OR». Де молодший біт байта контейнера може прийняти значення 0 або 1 із секретного повідомлення. Побітова логічна дія «OR» позначається в мові Python «|». Нижче представлений код програмного вбудовування текстового повідомлення в графічний файл (фотографію).

Програма приховування тексту та механізм її роботи. Програма розпочинається з під'єднання бібліотеки PIL для роботи із графічними файлами. Далі завантажується графічний файл контейнер та сам текст який надалі має бути прихований у графічному файлі.

```
from PIL import Image,ImageDraw      #підключення бібліотеки PIL
image = Image.open("img-100-.png")   # завантаження графічного файлу контейнера
image.show()                         # виводимо картинку image на екран
draw = ImageDraw.Draw(image)         # підготовка до перетворення image
file = open("secret_text.txt",'r',encoding="utf-8") # відкриття текстового файлу
text=file.read()                     # завантаження тексту в рядкову змінну text
text=text+'#'                        # додавання в кінець тексту знаку #
print(text);                         # вивід тексту зі змінної text на екран
file.close()                         # закриття текстового файлу
```

Після під'єднання бібліотеки і завантаження потрібних файлів в програмі відбуваються підготовчі дії необхідні для маскування тексту в графічному файлі. Відбувається перетворення тексту в бітовий масив, визначення ширини та висоти зображення (картинки контейнеру), завантаження значення пікселя в масив pix

```
bits_text=list(map(int,''.join([bin(ord(i)).lstrip('0b').rjust(16,'0') for i in text])))
width = image.size[0]       # визначення ширини зображення
height = image.size[1]      # визначення висоти зображення
pix = image.load()          # завантаження значення пікселів в масив pix
```

Далі сканування картинки за висотою та шириною, визначення міри червоності (R), зелeності (G), блакитності (B) кольору кожного пікселя. Впровадження чергових бітів тексту у відповідні байти R,G,B чергових пікселів.

```
N=0                         # [illegible]
for i in range(width):      # сканування пікселів по ширині
  for j in range(height):   # сканування картинки по висоті
    R = pix[i,j][0]         # визначення міри червоності кольору пікселя
    G = pix[i,j][1]         # визначення міри зеленості кольору пікселя
    B = pix[i,j][2]         # визначення міри блакитності кольору пікселя
    if len(bits_text)>N:    # якщо кількість бітів тексту не перевищує N
      R=(R&254)|bits_text[N] # впровадження чергового біту тексту в [illegible]
      N=N+1                 # номер наступного біту
    if len(bits_text)>N:    # якщо кількість бітів тексту не перевищує N
      G=(G&254)|bits_text[N] # впровадження чергового біту тексту в 2[illegible]
      N=N+1                 # номер наступного біту
    if len(bits_text)>N:    # впровадження чергового біту тексту
      B=(B&254)|bits_text[N] # впровадження чергового біту тексту в 3[illegible]
      N=N+1                 # номер наступного біту
    draw.point((i,j),(R,G,B)) # впровадження кольорів R,G,B в пікс (в картинку)
```

В кінці робота програми відбувається вивід на екран заповненого графічного контейнеру та збереження його разом з текстом.

```
image.show()                          # вивід картинки знову на екран
image.save("leo-1-.png", "PNG")       # збереження контейнеру разом з текстом
```

Безпосереднє впровадження тексту, як сукупності бітів, у графічний файл відбувається побітово почергово в кожний окремий поточний графічний байт. Зрозуміло, що алгоритмічно це організовано у вигляді двох вкладених один в одний циклів. Зупинка впровадження бітів тексту в графічний файл після їх закінчення реалізується відповідним розгалуженням. Нижче представлений арифметичний вираз, що реалізує впровадження чергового біту тексту в червоний колір чергового пікселя.

```
R =(R&254)|bits_text[N]
```

Як вже згадувалось, використання операцій «&» виконує роль логічної операції «AND» але в бітовій інформаційній розмірності. Аналогічно спрацьовує в бітовому просторі оператор «|». Його сенс логічна дія «OR». У виразі число 254_{10} грає роль бітової маски 11111110_2, про яку йшлося вище. Адже $254_{10} = 11111110_2$.

Представлена програма надає важливу для навчання криптографії, можливість спостереження процесу приховування тексту в медійний файл побітово. Ця можливість відкривається, якщо в програму добавити програмні фрагменти подібні наданому нижче.

```
if len(bits_text)>N:
    print('(',''.join(format(R,'b')),'&',''.join(format(254,'b')),')',end='|')
    R=(R&254)| bits_text[N]; N=N+1
    print(''.join(format(bits_text[N], 'b')),"=",''.join(format(R, 'b')))
```

Ця можливість є досить цінною, якщо використовувати програму, як аплікаційну, на лекційному занятті при демонстрації процесу приховування інформації в графічному файлі.

Програма вилучення прихованого тексту та механізм її роботи. Для вилучення тексту з графічного файлу необхідно запустити представлений нижче код. Як і попередня, ця програма починається з підключення бібліотеки Python Pillow для роботи з графічними файлами. Далі відбувається безпосереднє завантаження графічного файлу, який надалі співвідноситься з змінною image. Саме тут знаходиться текст прихований в графічному файлі. Для виділення цього тексту трансформуємо його в масив пікселів pix та започатковуємо список extracted для накопичення бітів тексту, що будуть видобуватись з картинки контейнеру.

```
from PIL import Image, ImageDraw # підключення бібліотеки PIL
image = Image.open("leo-1-.png") # завантаження графічного файлу в image
image.show();                    # виводиться картинка image на екран
width = image.size[0]            # визначення ширини зображення.
height = image.size[1]           # визначення висоти зображення
pix = image.load()               # трансформація файлу в список пікселів pix
extracted=[]                     # відкриття списку extracted
```

Далі проводиться безпосереднє вилучення всіх найменших значущих бітів з графічних байтів в змінну extracted з подальшою перспективою на об'єднання їх в коди букв в змінній text.

Зрозуміло, що цей процес реалізується двома циклами сканування картинки по ширині і висоті.

```
for i in range(width):      # сканування картинки по ширині
  for j in range(height): # сканування картинки по висоті
     R = pix[i,j][0]       # визначення міри червоності кольору пікселя
     G = pix[i,j][1]       # визначення міри зеленості кольору пікселя
     B = pix[i,j][2]       # визначення міри блакитності кольору пікселя
     # [illegible]
     [illegible]           # [illegible]
     [illegible]           # [illegible]
     [illegible]           # [illegible]
# [illegible]
text = ''.join(chr(int(''.join(map(str,extracted[i:i+8])),2)) for i in range(0,len(extracted),8))
decoded = text.split("#")[0] # вирізка тексту, що закінчується до символу розділювача
print("[illegible]", decoded) # роздруковка [illegible]
```

Практична цінність приховування інформації. Було проведено випробовування програм з текстами різної довжини та з графічними контейнерами різного ґатунку. Експеримент показав коректне відтворення текстів, що були записані, як латиницею, так і кирилицею. Автори не побачили візуальних відмінностей між порожніми і заповненими контейнерами. Проводився також експеримент з впровадженням тексту в картинку, що була чистим білим листом. Однак текстових вкладень у вигляді якихось кольорових аномалій не побачили.

Однак, необхідно відмітити, якщо сторона, що перехопила замасковане повідомлення, має здогадки про факт закладки та спосіб закладки, то текст, що був прихований описаним вище способом легко вилучається. Тому використання програми у практичних цілях вимагає додаткових маніпуляцій в коді, зокрема пов'язаних з порядком, щільністю впровадження тексту та з вибором місця впровадження. Бажаним є також додаткове шифрування тексту хоча б простим методом. Таке шифрування можливо і окремою програмою.

Цінність представленої програми для навчальних цілей. При реалізації програми була застосована загальновживана бібліотека для роботи з графічними файлами. Лаконічність коду програми та використання бібліотеки Pillow дає можливість контрастно візуалізувати механізм приховування інформації на навчальних заняттях. Так на заняттях з криптографії і стеганографії така демонстрація можлива, як на відповідному лекційному занятті, так і в процесі проведення лабораторної роботи. На заняттях з програмування механізм приховування добре демонструвати вживу в процесі створення програми, її відлагодження та випробовування. Важливо для навчальних цілей і те, що робота в межах бібліотеки Pillow дозволяє на рівні окремих байтів кольорів пікселя побачити стан порожнього та заповненого графічного контейнеру.

Аналіз графічного файлу і маніпуляції з ним на рівні окремих бітів має також навчальну цінність в тому сенсі, що дає уявлення про рівень шумів та величину корисного фізичного сигналу та межі чутливості людського зору.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

- Реалізовано просту програму, що дозволяє приховувати текстову інформацію в графічному файлі. Контроль заповненого і не заповненого графічного контейнера не виявили відмінностей. Заповнений і порожній контейнер мають однаковий розмір.
- Програма цікава для навчальних цілей завдяки лаконічності і прозорості програмного коду. Механізми приховування інформації в графічному файлі тут легко візуалізується. Програма може бути використана, як ілюстрація на лекційному занятті при демонстрації її роботи вживу через проектор. Корисна ця задача і при її реалізації на лабораторному занятті.
- Аналіз картинки, як фізичного сигналу, на рівні окремих бітів, що відкривається при використанні програми, має також значну навчальну цінність. Маніпуляції з графікою на такому низькому рівні дають уявлення про амплітуду корисного фізичного сигналу, рівень шумів, межі чутливості людського зору. Цікаві також і ресурси для приховування в сигналі сторонньої інформації.
- Використання програми в практичних цілях вимагає додаткових маніпуляцій в коді, зокрема, пов'язаних з порядком та з щільністю впровадження тексту, з вибором його місця розташування в файлі. Бажаним є також додаткове шифрування тексту хоча б простим методом.

Список бібліографічного опису

1. Kefa Rabah. Steganography-The Art of Hiding Data. Information Technology Journal, 2004. 3 (3). P. 245-269. https://scialert.net/fulltext/fulltextpdf.php?pdf=ansinet/itj/2004/245-269.pdf
2. Г. Ф. Конахович, Д. О Прогонов, О. Ю. Пузиренко, *Комп'ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних* [підручник]. К.: Центр навчальної літератури, 2018. 558 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Konahovich_2018_558.pdf
3. Hegarty, M., and Keane, A. Steganography: The World of Secret Communications. 2018. 88 p.
4. Hassanzadeh, M. Digital Media Steganography: Principles, Algorithms, and Advances. Academic Press 2020. https://www.researchgate.net/publication/342612077_Digital_Media_Steganography_Principles_Algorithms_Advances
5. Tamm, S. Codes, Ciphers, Steganography & Secret Messages. Answers Limited. 2020. https://ia601800.us.archive.org/4/items/7-the-code-breaker/7-%20The%20Code%20Breaker.pdf
6. Wayner, P. Disappearing cryptography: information hiding: steganography & watermarking. 2002. 413p. https://search.worldcat.org/title/1024951811
7. Головін М.Б., Головіна Н.А. Навчальний приклад маскування інформації в акустичному сигналі. *Наукові записки Бердянського державного педагогічного університету. Серія: Педагогічні науки.* Вип. 2. С. 203-211. 2021. Doi https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/19745
8. [illegible]

References

1. Kefa Rabah. Steganography-The Art of Hiding Data. Information Technology Journal, 2004. 3 (3). P. 245-269. https://scialert.net/fulltext/fulltextpdf.php?pdf=ansinet/itj/2004/245-269.pdf
2. G.F. Konakhovych, D.O. Progonov, O. Yu. Puzyrenko, Computer steganographic processing and analysis of multimedia data [textbook]. K.: Center of Educational Literature, 2018.
3. Hegarty, M., and Keane, A. Steganography: The World of Secret Communications. 2018. 88 p.
4. Hassanzadeh, M. Digital Media Steganography: Principles, Algorithms, and Advances. Academic Press 2020. https://www.researchgate.net/publication/342612077_Digital_Media_Steganography_Principles_Algorithms_Advances
5. Tamm, S. Codes, Ciphers, Steganography & Secret Messages. Answers Limited. 2020. https://ia601800.us.archive.org/4/items/7-the-code-breaker/7-%20The%20Code%20Breaker.pdf
6. Wayner, P. Disappearing cryptography: information hiding: steganography & watermarking. 2002. 413p. https://search.worldcat.org/title/1024951811
7. Holovin M., Holovina N. A case study of information masking in the acoustic signal. *Scientific notes of Berdyansk State Pedagogical University. Series: Pedagogical sciences.* Issue 2. P.203 -211. 2021. doi https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/19745
8. [illegible]

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-12
УДК 004.9

Готович Володимир Анатолійович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-2143-6818
Карташов Віталій Вікторович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-0530-5919
Максим'юк Юрій Богданович, аспірант
https://orcid.org/0009-0008-2489-8659
Матійчук Любомир Павлович, д.е.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-6701-4683
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

ЗАДАЧА РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ МІСЦЕВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПОВІЩЕННЯ

Готович В. А., Карташов В. В., Максим'юк Ю. Б., Матійчук Л. П. Задача розробки програмної платформи для місцевої автоматизованої системи централізованого оповіщення. У статті розглядається задача створення сучасної програмної платформи для місцевої автоматизованої системи централізованого оповіщення (МАСЦО), яка є ключовим елементом інфраструктури цивільного захисту в умовах зростаючої загрози надзвичайних ситуацій та воєнного стану. Проаналізовано чинну нормативно-правову базу України, зокрема Концепцію модернізації системи централізованого оповіщення, а також зарубіжні приклади реалізації подібних систем (Emergency Alert в Австралії, WEA у США, Reverse 112 в ЄС). У результаті проведеного аналізу запропоновано багаторівневу хмарно-орієнтовану архітектуру платформи за моделлю «cloud-edge», у якій критичні сервіси (керування сценаріями, база даних, обробка подій) розміщені у хмарі, а безпосереднє доведення сигналів забезпечують локальні шлюзи та кінцеві пристрої (електросирени, гучномовці, інформаційні табло). Описано функціональні можливості платформи: автоматизований або ручний запуск сигналів тривоги, мультиканальне інформування населення (через сирени, SMS, Cell Broadcast, телебачення, інтернет), підтримка сценаріїв, віддалене адміністрування, візуалізація стану системи на електронній мапі, а також моніторинг і тестування обладнання. Значну увагу приділено питанням кібербезпеки: реалізовано багаторівневу авторизацію, журналювання дій, шифрування команд, резервування каналів і інфраструктури. Платформа підтримує інтеграцію з існуючим обладнанням та службами через стандартизовані протоколи (NAPAPI, CAP) і передбачає подальший розвиток за такими напрямами: впровадження AI-модулів прогнозування загроз, інтеграція з ГІС, мобільними додатками (зокрема "Дія"), підтримка IoT-пристроїв, блокчейн-аудит, інклюзивність інтерфейсів. Запропоноване рішення дозволяє суттєво підвищити надійність, масштабованість і швидкість реагування системи, відповідає міжнародним практикам і може стати основою для модернізації оповіщення на рівні територіальних громад.

Ключові слова: система централізованого оповіщення, МАСЦО, хмарна архітектура, cloud-edge, телекомунікаційні мережі, інформування населення, надзвичайні ситуації, цивільний захист.

Hotovych V., Kartashov V., Maksymyuk Y., Matiichuk L. The task of developing a software platform for a local automated centralized alert system. The article explores the development of a modern software platform for a local automated centralized public warning system (LAPWS), which serves as a key component of civil protection infrastructure amid increasing risks of emergencies and wartime conditions. The study analyzes the current legal and regulatory framework in Ukraine, including the Concept for the modernization of the centralized public warning system, as well as foreign implementations such as Australia's Emergency Alert, the U.S. Wireless Emergency Alerts (WEA), and the EU's Reverse 112 systems. Based on this analysis, the article proposes a multi-level cloud-oriented platform architecture following the "cloud-edge" model, where critical services (scenario management, database operations, and event processing) are hosted in the cloud, while the direct delivery of alerts is handled by local edge gateways and end-user devices (electronic sirens, loudspeakers, and digital signage). The functional capabilities of the platform are described in detail: automated or manual initiation of alarm signals, multi-channel public alerting (via sirens, SMS, Cell Broadcast, TV, and the Internet), scenario-based operation, remote administration, real-time visualization of system status on a digital map, and hardware monitoring and testing. Particular attention is given to cybersecurity measures, including multi-level user authorization, activity logging, command encryption, and infrastructure redundancy. The platform supports integration with existing equipment and national systems through standardized protocols (NAPAPI, CAP) and envisions further development in areas such as AI-based threat prediction, integration with geographic information systems (GIS), mobile applications (including "Diia"), IoT support, blockchain-based audit trails, and inclusive interface design. The proposed solution significantly improves system reliability, scalability, and response time, aligns with international best practices, and offers a practical foundation for modernizing emergency alert systems at the community level.

Keywords: centralized public warning system, LAPWS, cloud architecture, cloud-edge, telecommunications network, public alerting, emergencies, civil protection.

Постановка задачі. Забезпечення своєчасного та ефективного оповіщення населення про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій є одним із ключових завдань національної системи цивільного захисту. У контексті сучасних викликів, зокрема повномасштабної війни, кліматичних

катастроф і технологічних ризиків, значно зростає потреба у надійних, масштабованих та захищених інструментах для інформування громадян.

Оповіщення населення про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій є одним із ключових завдань цивільного захисту на державному і місцевому рівнях. Від оперативності та надійності системи централізованого оповіщення залежить своєчасне реагування населення на небезпеку, мінімізація можливих втрат і збитків. Зокрема, під час повітряних тривог, які стали частими в умовах повномасштабної агресії проти України, ефективність систем оповіщення безпосередньо впливала на життя та безпеку населення в містах і селищах. Існуюча система оповіщення України була створена ще у 1970–1980-х роках за командно-сигнальним принципом і наразі не відповідає сучасним вимогам [1]. Структура успадкованої системи не враховує сучасної організації органів влади, нової структури цивільного захисту та сучасних технологічних можливостей [1]. У зв'язку з цим Урядом було схвалено Концепцію розвитку та технічної модернізації системи централізованого оповіщення (2018 р.) [1] і затверджено План заходів її реалізації [2]. Цими документами передбачено поступове оновлення загальнодержавної автоматизованої системи оповіщення та створення ефективних територіальних і місцевих підсистем. Задача розробки сучасної програмної платформи для місцевої автоматизованої системи централізованого оповіщення (МАСЦО) є актуальним і пов'язаним із загальнодержавними заходами у сфері цивільного захисту, зокрема технічної модернізації систем оповіщення.

Дана задача ускладнюється фрагментарністю підходів до впровадження локальних систем оповіщення, відсутністю уніфікованої платформи, недостатньою інтеграцією з національними системами ДСНС та обмеженими можливостями адаптації до різних каналів доведення інформації до населення (мобільні мережі, Інтернет, радіо, телебачення). Крім того, постає необхідність забезпечення високого рівня кібербезпеки та надійності, підтримки сучасних принципів цифрової трансформації й міжсистемної взаємодії.

Таким чином, розробка єдиної МАСЦО є актуальною науково-технічною задачею, яка знаходиться на перетині інтересів державної безпеки, інформаційних технологій, телекомунікацій, системного проєктування та кіберзахисту. Її вирішення дозволить підвищити ефективність реагування на надзвичайні ситуації, зменшити рівень збитків та забезпечити стійкість функціонування критичної інфраструктури. Запропоновані рішення можуть бути використані органами місцевого самоврядування та ДСНС при створенні або модернізації локальних систем оповіщення. Впровадження описаної платформи дозволить підвищити ефективність і оперативність оповіщення населення про надзвичайні ситуації, забезпечити сумісність обладнання різних виробників, централізований контроль та високий рівень надійності системи в цілому. Наведені рекомендації щодо подальших робіт вказують напрям для розробників і відповідальних служб у реалізації сучасної МАСЦО.

Огляд сучасних досліджень і рішень, проблемні аспекти. Питанню оповіщення населення та модернізації відповідних систем присвячено ряд нормативних актів і науково-практичних досліджень. Зокрема, постановою Кабінету Міністрів України №733 (2017 р.) затверджено Положення про організацію оповіщення і зв'язку у сфері цивільного захисту, яке визначає структуру та функції єдиної державної системи оповіщення [3]. В цьому Положенні встановлено поділ на загальнодержавну систему, територіальні та локальні підсистеми, включаючи місцеві автоматизовані системи централізованого оповіщення на рівні областей, районів, громад і міст. Згідно з наведеним в Положенні визначенням, місцева автоматизована система оповіщення населення – це програмно-технічний комплекс, призначений для доведення сигналів і повідомлень керівному складу місцевих органів влади та населенню на відповідній території адміністративно-територіальної одиниці [4]. Наказом МВС України №93 (2019 р.) затверджено Інструкцію щодо проєктування, впровадження в експлуатацію, експлуатації та технічного обслуговування автоматизованих систем централізованого оповіщення [5], що встановлює вимоги до створення таких систем. Це нормативне підґрунтя підкреслює увагу держави до стандартизації та надійності систем оповіщення.

Попри наявність законодавчої бази, реалізація сучасних рішень на місцях стикається з низкою труднощів. Аналіз стану місцевих систем оповіщення показує, що багато з них перебувають у застарілому чи навіть занедбаному стані та функціонують з низькою ефективністю [6]. Причинами

цьому є обмежене фінансування, зношеність обладнання (електросирени радянського зразка, аналогові засоби зв'язку тощо), а також фрагментарність модернізації систем в різних регіонах. Деякі міста і громади вже впроваджують нові локальні системи оповіщення, але відсутність єдиної платформи призводить до розрізненості рішень та проблем сумісності. Зокрема, відзначається недостатня інтеграція з сучасними каналами оповіщення (мобільні мережі, інтернет-платформи), обмежені можливості дистанційного контролю стану обладнання та кіберзахисту систем.

Варто звернути увагу на досвід зарубіжних країн, які успішно реалізували сучасні системи оповіщення населення. Наприклад, в Австралії діє національна система Emergency Alert, яка дозволяє екстреним службам надсилати голосові повідомлення на стаціонарні телефони і текстові SMS-повідомлення на мобільні телефони у визначеній зоні небезпеки [7]. У США функціонує інтегрована система оповіщення IPAWS, що включає технологію Wireless Emergency Alerts (WEA) надсилання коротких екстрених оповіщень на мобільні телефони за технологією стільникового мовлення (cell broadcast) з географічним таргетуванням [8]. В Європейському Союзі з 2018 року законодавчо зобов'язано всі країни-члени впровадити системи оповіщення, що здатні розсилати попередження на телефони громадян у визначеному районі (так звані служби "Reverse 112"). Згідно з Європейським кодексом електронних комунікацій, з червня 2022 року кожна держава ЄС повинна забезпечити можливість надсилання таких оповіщень на мобільні пристрої населення [9]. При цьому наголошується на багатоканальному підході: окрім мобільних телефонів, задіюються також сирени, радіо і телебачення, інтернет-сайти, соцмережі, електронна пошта тощо – щоб максимально охопити всі верстви населення [9]. Впроваджені за кордоном технології демонструють ефективність поєднання централізованого керування з різноманітними каналами доведення інформації, а також важливість забезпечення стійкості та кібербезпеки таких систем. Цей досвід є цінним орієнтиром для України при розробці власної програмної платформи МАСЦО.

Необхідність вирішення зазначених проблем та врахування кращих світових практик обумовлює актуальність дослідження і розробки єдиної програмної платформи для місцевих систем оповіщення. Основними викликами є: відсутність стандартизації програмно-апаратних рішень, несумісність компонентів (сирени, засоби зв'язку, програмне забезпечення), обмежена інтеграція з загальнонаціональною системою, потреба у впровадженні нових каналів оповіщення (мобільні сповіщення, інтернет-додатки) при збереженні надійності традиційних засобів (стаціонарні сирени, радіомовлення), а також необхідність забезпечення високого рівня кібербезпеки системи. Таким чином, постає завдання чіткого визначення вимог та архітектури програмної платформи МАСЦО, яка б відповідала сучасним критеріям ефективності, оперативності та безпеки.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність нормативного регулювання та окремі спроби модернізації систем централізованого оповіщення в Україні, залишаються нерозв'язаними на науково-методичному та інженерному рівнях такі задачі:

1. Досі відсутня уніфікована, масштабована та стандартизована програмна платформа для побудови МАСЦО, здатна інтегруватися з національними інфраструктурами ДСНС, а також підтримувати різнорідні кінцеві пристрої (цифрові сирени, табло, мобільні канали тощо).

2. Реалізація сучасної хмарноорієнтованої архітектури системи з підтримкою принципу «cloud-edge», що дозволяє забезпечити одночасно централізоване управління і локальну автономність у разі втрати зв'язку. Задача потребує розробки спеціалізованих сценаріїв передачі команд, механізмів резервування, автоматичного відновлення функціонування та подолання затримок у телеметрії.

3. Вирішення комплексу питань інформаційної безпеки, включаючи застосування сучасних криптографічних протоколів, механізмів автентифікації, журналювання подій та захисту від кіберзагроз у розподіленому середовищі.

Також маловисвітленими залишаються аспекти інтеграції з джерелами даних про загрози (давачі, моніторингові системи, геоінформаційні платформи), автоматичного запуску сценаріїв оповіщення, та підтримки інклюзивних каналів інформування (Text-to-Speech, мультимовність, адаптація для осіб з інвалідністю).

Мета дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування та розробка архітектурного і функціонального підходу до створення програмної платформи для МАСЦО, яка забезпечує високу надійність, масштабованість, інформаційну безпеку та здатність до інтеграції з

національними та регіональними системами цивільного захисту. У межах цієї мети дослідження передбачає аналіз нормативно-правових та технічних передумов побудови таких систем, визначення вимог до ключових компонентів платформи, моделювання її загальної структури з використанням сучасних хмарних технологій, опис механізмів багатоканального інформування та розробку принципів забезпечення відмовостійкості та міжсистемної взаємодії. Очікуваним результатом є формування цілісної концепції уніфікованої платформи МАСЦО, що може бути практично реалізована в умовах цифрової трансформації сфери цивільного захисту.

Основні результати дослідження. На основі проведеного огляду науково-технічних публікацій та діючих нормативних документів виявлено значні недоліки відомих інформаційних систем. В даній роботі пропонується програмна платформа МАСЦО, яка реалізує гібридну модель «cloud-edge». Усі критичні сервіси (управління, обробка подій, зберігання конфігурацій і журналів) розгортаються в публічній або державній хмарі (наприклад, на базі Microsoft Azure), що забезпечує автоматичне масштабування, геореплікування та керовану безпеку (рис. 1). На території громад залишається лише "тонка" шлюзи (edge-gateway) – компактні промислові контролери або одноплатні комп'ютери, підключені до локальної мережі пристроїв оповіщення (сирен, табло, гучномовців). Кожен такий шлюз відповідає за обмін телеметрією з хмарою, кешування критичних сценаріїв, підтримку черг локального кешу для подій, що не були передані через втрату зв'язку, і їх автоматичну ретрансляцію після відновлення з'єднання. Завдяки цьому шлюз забезпечує автономну роботу при короткочасній або нестабільній втраті зв'язку, не втрачаючи критичних подій або команд.

Рис. 1. Архітектура хмарного шару програмної платформи МАСЦО

У хмарі функціонують декілька рівнів, які взаємодіють на основі подієвої (event-driven) моделі через асинхронні черги Service Bus / Event Grid. Це забезпечує стійкість до відмов окремих компонентів і еластичне масштабування трафіку. До таких рівнів належать:

- рівень управління включає мікросервіси, розгорнуті в контейнерах (Azure App Service for Containers або Azure Kubernetes Service), які приймають команди операторів, формують сценарії оповіщення, проводять аутентифікацію та авторизацію (Azure AD B2C) і публікують команди у шину повідомлень;
- рівень подій – керована шина (Azure Event Grid чи Service Bus), що гарантує доставку команд до edge-шлюзів і збір телеметрії від пристроїв;
- рівень даних та аналітики – функціонує як PaaS. Тут використовується БД (Azure SQL / Cosmos DB) з даними конфігурацій, а дані телеметрії та логи пишуться до Azure Data Explorer або Blob Storage. Також наявна потокова аналітика (Azure Stream Analytics), що виявляє аномалії й автоматично запускає сценарії;
- рівень безпеки – секрети й ключі зберігаються в Azure Key Vault, мережевий доступ обмежено приватними кінцевими точками та Azure Firewall; резервні копії автоматично реплікуються у вторинний регіон.

Робочі місця операторів взаємодіють із хмарою через веб-інтерфейс або мобільний застосунок; доступ можливий з будь-якого місця на основі захищеного каналу HTTPS/VPN. Критичні мікросервіси розгортаються у декількох регіонах з автоматичним перемиканням трафіку (Azure Front Door / Traffic Manager). Така хмарно-орієнтована архітектура усуває потребу у дорогому локальному дата-центрі, спрощує масштабування системи разом із розширенням мережі сирен і мінімізує час відновлення після відмови.

Основні компоненти та їх функції. Програмна платформа МАСЦО складається з кількох ключових компонентів (рис. 2).

Рис. 2. Основні компоненти програмної платформи МАСЦО

На даному рисунку:

• рівень управління – набір керованих сервісів PaaS (веб-API, мікросервіси сценаріїв оповіщення, шина повідомлень і база даних конфігурації), розгорнутих у кількох регіонах хмари. Шар забезпечує централізовану логіку оповіщення, аутентифікацію користувачів і інтеграцію з національною системою ДСНС. Дані зберігаються у керованих БД (Azure SQL / Cosmos DB) з автоматичним резервуванням, журнали подій – у Data Lake;

• комунікаційний рівень – набір апаратно-програмних засобів, що здійснюють передачу сигналів від сервера до кінцевих пристроїв. Він підтримує декілька типів інтерфейсів: мережеві (TCP/IP), радіоінтерфейси (через радіомодеми DMR чи інші), телефонні лінії. Комунікаційний модуль кодує повідомлення оповіщення у відповідний формат для кожного каналу (наприклад, формує пакет для увімкнення сирени через радіоканал або SIP-повідомлення для VoIP оповіщення по мережі);

• пристрої оповіщення – апаратні пристрої, які безпосередньо доводять сигнал до населення. Найбільш розповсюджені – це електросирени, які можуть подавати гучний звуковий сигнал тривоги (сирени потужністю 400–1200 Вт, встановлені на дахах будівель чи окремих опорах) [5]. Сучасні сирени забезпечують дистанційне керування режимами звучання і можуть мати вбудовані гучномовці для трансляції мовних повідомлень. Окрім сирен, до кінцевих пристроїв можуть належати системи гучномовного зв'язку (вуличні гучномовці), пристрої передачі повідомлень на локальне FM-радіо або кабельне телебачення, SMS- або Cell Broadcast шлюзи для розсилки оповіщень на мобільні телефони, інформаційні електронні табло, а також спеціальні пристрої для оповіщення установ (наприклад, внутрішні сирени на промислових об'єктах, школи тощо). Усі такі пристрої оснащені модулями зв'язку для прийому команд від центрального серверу;

• інтерфейс оператора (програмне забезпечення АРМ) – призначений для користувачів системи (чергових диспетчерів, адміністраторів). Інтерфейс надає можливості запуску оповіщення (вручну чи вибором заздалегідь підготовленого сценарію), контролю за перебігом оповіщення, а також моніторингу стану системи. Важливою функцією є візуалізація, на екрані оператора відображається електронна карта місцевості з позначками всіх точок встановлення сирен та інших пристроїв, їх поточний статус (справний, несправний, активований тощо) [5]. Оператор може вибірково вмикати оповіщення в окремих зонах або для окремих груп пристроїв, що особливо корисно при локальних надзвичайних ситуаціях. Інтерфейс також дозволяє скласти текст екстреного повідомлення, який потім буде передано каналами зв'язку (наприклад, як SMS чи голосове повідомлення). Окрім ручного введення, підтримується вибір шаблонів повідомлень і попередньо збережених сценаріїв, що значно спрощує роботу оператора в умовах стресу або обмеженого часу на реагування.

Пропонована програмна платформа повинна забезпечувати декілька режимів роботи для різних ситуацій. Основний режим – автоматизоване оповіщення при надзвичайній ситуації. Система цілодобово моніторить канали отримання сигналів тривоги: це можуть бути сигнали від регіонального центру (територіальної автоматизованої системи), команди від ДСНС України або натискання "тривожної кнопки" місцевим черговим. При надходженні сигналу "Увага всім" система негайно запускає алгоритм оповіщення: передає команду на увімкнення всіх електросирен у зоні відповідальності, а також розсилає інші повідомлення згідно зі сценарієм. Сценарій може передбачати паралельне відправлення голосового оповіщення по телекомунікаційних мережах (наприклад, автоматичний обдзвін керівного складу по телефону, розсилка SMS населенню тощо). Важливо, що сучасна система може надавати не лише звуковий сигнал сирени, а й супровідну інформацію. Зокрема, після звучання сирени може слідувати мовне повідомлення з інструкціями для населення (через гучномовці), або текстові повідомлення для різних груп отримувачів. Наприклад, керівники установ отримають повідомлення з вимогою ввімкнути локальні системи оповіщення і провести евакуацію, а населення – інформацію про характер небезпеки та найближчі укриття.

Окрім аварійного режиму, платформа підтримує режим планового інформування і тестування. Регламентні випробування системи (щомісячні чи щоквартальні перевірки сирен) можуть здійснюватися автоматично у попередньо запланований час [4]. Програмне забезпечення проводить дистанційне тестування: короткочасно запускає сигнали або здійснює беззвучний тест

(перевіряючи підключення і стан кожної сирени), фіксує результати і формує звіт для технічного персоналу. Такі можливості суттєво полегшують обслуговування системи.

Оскільки система оповіщення є критично важливою, особлива увага приділяється захисту від несанкціонованого доступу, збоїв та кібератак. В програмній платформі реалізовано багаторівневий захист, який охоплює ідентифікацію користувачів, захищені канали обміну, фізичну та програмну надійність компонентів, а також заходи щодо відновлення після збоїв.

Аутентифікація та авторизація реалізуються шляхом використання надійних паролів і двофакторної автентифікації, з диференціацією прав доступу відповідно до ролей користувачів. Усі дії операторів фіксуються в журналі подій для подальшого аудиту.

Передача команд до кінцевих пристроїв здійснюється із застосуванням шифрування, зокрема протоколів SSL/TLS для IP-мереж або захищених радіоалгоритмів, що виключає можливість перехоплення або фальсифікації сигналів оповіщення.

Серверна частина платформи працює в захищеному хмарному середовищі з використанням міжмережевих екранів, засобів антивірусного захисту, автоматичного резервного копіювання та регулярного оновлення програмного забезпечення. Критичні компоненти резервуються: передбачено дублюючий сервер і альтернативні канали зв'язку на випадок виходу з ладу основного обладнання.

Фізичну надійність забезпечують кінцеві пристрої, які мають автономні джерела живлення (акумулятори, сонячні панелі) та автоматичне перемикання на резерв у разі зникнення основного живлення [4].

Завдяки узгодженому застосуванню цих заходів досягається цілісний рівень інформаційної безпеки та стійкості системи до зовнішніх і внутрішніх загроз.

Розроблювана програмна платформа спроектована з відкритою архітектурою, що полегшує її інтеграцію з іншими системами та розширення функціональності. Зокрема, підтримується сумісність з обладнанням різних виробників, що вже використовується на об'єктах цивільного захисту. На основі стандартизованих протоколів (NAPAPI – National Alerting Protocol API, або міжнародний стандарт CAP – Common Alerting Protocol) система може автоматично приймати сигнали від загальнодержавної системи оповіщення та передавати їх далі на місцевий рівень без втручання людини. Аналогічно, місцева система здатна ретранслювати екстрені повідомлення до широкого кола інших каналів: автоматично оприлюднювати повідомлення на офіційних веб-сайтах органів влади, у мобільних додатках, надсилати їх до централізованих медіасистем (телебачення, радіо) тощо.

Важливою функцією є інтеграція з джерелами даних про небезпеки – наприклад, з автоматизованими системами моніторингу (метеорологічними давачами, системами спостереження за станом дамб, давачами на підприємствах). Програмна платформа може отримувати від них попереджувальні сигнали і за визначеними алгоритмами автоматично ініціювати оповіщення при перевищенні порогових значень (наприклад, сигнал від сейсмографа про землетрус). Така взаємодія перетворює систему оповіщення на частину широкої екосистеми "розумного" протистояння надзвичайним ситуаціям.

Розроблювана платформа МАСЦО забезпечує п'ять взаємопов'язаних груп функцій, що охоплюють повний цикл оповіщення – від формування сигналу до післяаварійного аналізу. До таких функціональних груп належать:

1. Формування та ініціація оповіщення – створення сигналів тривоги вручну або автоматично на основі зовнішніх подій, шаблонів сценаріїв або даних з моніторингових систем;

2. Багатоканальне доведення інформації – передача повідомлень через сирени, гучномовці, мобільні повідомлення (SMS, Cell Broadcast, push), радіо, телебачення, електронні табло, вебінтерфейси та інші засоби;

3. Моніторинг і самодіагностика – контроль стану кінцевих пристроїв у реальному часі, виявлення несправностей, ведення журналів подій і технічних перевірок;

4. Адміністрування та управління конфігурацією – налаштування зон оповіщення, прав доступу, розкладів тестувань і сценаріїв оповіщення через централізований інтерфейс;

5. Аналітика та аудит подій – збір телеметрії, оцінка ефективності оповіщення, формування звітів і аналіз післяаварійних дій, зокрема із залученням засобів штучного інтелекту.

Платформа забезпечує централізоване й дистанційне керування процесом оповіщення: оператор через веб-консоль або мобільний застосунок може одним клацанням активувати всі сирени чи обрати конкретні групи сирен, а також запустити попередньо налаштовані сценарії для різних типів надзвичайних ситуацій. Одночасно реалізується принцип мультиканальності, що поєднує звукові сирени, мовні повідомлення через гучномовці, SMS-, Cell-Broadcast- та push-сповіщення на мобільні телефони, електронні листи, інтеграцію з інформаційними табло, локальним FM-радіо й кабельним телебаченням, забезпечуючи максимальне охоплення аудиторії та дублювання критичної інформації різними носіями [9].

Безперервний моніторинг і самодіагностика обладнання дають змогу у реальному часі відстежувати параметри кожного кінцевого пристрою оповіщення (живлення, заряд акумулятора, стан корпусу, температура тощо); результати регламентних тестів автоматично фіксуються у журнали, а у разі відхилень генерується сповіщення про технічну тривогу [4]. Гнучкість та масштабованість досягаються завдяки можливості легкого додавання нових пристроїв, перегрупування зон оповіщення, призначення ролей користувачам і підключення додаткових каналів (наприклад, 5G/LTE-M або інтеграції з мобільним застосунком «Дія») без зупинки сервісу. Відмовостійкість і безпека гарантуються резервуванням каналів зв'язку, джерел живлення та хмарних сервісів, що забезпечує безперервність оповіщення навіть за умови часткового пошкодження інфраструктури у воєнний час чи під час стихійних лих.

Завдяки такій композиції функцій платформа досягає високого рівня автоматизації, залишаючи за оператором контроль критичних рішень. У підсумку така локальна система здатна оперативно реагувати на зовнішні команди та внутрішні сигнали небезпеки, доводячи до населення як загальний сигнал тривоги, так і детальні інструкції щодо дій у надзвичайній ситуації.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз підходів до побудови МАСЦО та розроблена концепція програмної платформи підтверджують доцільність створення уніфікованого рішення на місцевому рівні. Запропонована хмарно-орієнтована архітектура «cloud-edge» із управлінським функціоналом в державній або публічній хмарі та периферійними edge-вузлами забезпечує масштабованість, георезервування та функцію управління безпекою. Поєднання багатоканальних засобів зв'язку з інтелектуальними кінцевими пристроями (цифровими сиренами, табло, мобільними сповіщеннями) створює комплексне рішення, що відповідає сучасним вимогам швидкості, надійності та кіберстійкості. Рішення узгоджується з державною Концепцією модернізації оповіщення [1] і може стати технічною основою для практичної реалізації Плану заходів [2].

Подальший розвиток платформи передбачає декілька взаємопов'язаних векторів.

- Перший – впровадження AI-підтримки прийняття рішень на основі застосування модулів машинного навчання, здатних прогнозувати розвиток надзвичайних ситуацій, визначати зони ураження за телеметрією сенсорних мереж і формувати рекомендації щодо оптимальних сценаріїв оповіщення;
- Другий – поглиблення інтеграції з геоінформаційними системами (ArcGIS, QGIS, Azure Maps) для візуалізації зон небезпеки у реальному часі, планування маршрутів евакуації та автоматизованого вибору пристроїв оповіщення;
- Третій – розширення функціоналу шляхом підтримки 5G/LTE-M для IoT-сирен, інтеграції з мобільним застосунком «Дія» та системою e-SMS, запровадження блокчейн-аудиту журналів і забезпечення мультимовних та інклюзивних каналів (субтитри, TTS-синтез);
- Четвертий – заходи щодо поглиблення рівня кібербезпеки, зокрема впровадження zero-trust-моделі доступу, використання апаратних модулів безпеки (HSM) для підписування команд і застосування AI-систем виявлення аномалій;
- П'ятий – міжрегіональна та міжнародна інтероперабельність на основі стандартизації форматів обміну даними між рівнями системи та сумісності із платформами сусідніх країн для координації дій у прикордонних зонах.

Практична реалізація зазначених напрямів досліджень дозволить підвищити ефективність і технологічну зрілість місцевих систем оповіщення, зробити їх частиною єдиної цифрової екосистеми безпеки та цивільного захисту.

Список бібліографічного опису:

1. Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 31.01.2018 №43-р «Про схвалення Концепції розвитку та технічної модернізації системи централізованого оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій». – 2018. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/43-2018-р (дата звернення: 15.04.2025).
2. Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 11.07.2018 №488-р «Про затвердження плану заходів щодо реалізації Концепції розвитку та технічної модернізації системи централізованого оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій». – 2018. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/488-2018-р.
3. Кабінет Міністрів України. Постанова від 27.09.2017 №733 «Про затвердження Положення про організацію оповіщення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайних ситуацій та організацію зв'язку у сфері цивільного захисту». – 2017. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2017-п.
4. Створення місцевої автоматизованої системи оповіщення та забезпечення цивільного захисту населення м. Чернігів : звіт / ТОВ «ЗНІ Компані». – URL: [illegible] (дата звернення: 15.04.2025).
5. Міністерство внутрішніх справ України. Наказ від 08.02.2019 №93 «Про затвердження Інструкції щодо проєктування, введення в експлуатацію, експлуатації та технічного обслуговування автоматизованих систем централізованого оповіщення» (зареєстрований в Мін'юсті 25.02.2019 за №418/33389). – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0418-19.
6. Дем'янчук І.Я. Оповіщення населення великих міст про загрозу або виникнення надзвичайних ситуацій: реалізація повноважень органів управління // Ефективність державного управління. – 2019. – №3(60). с.82–93.
7. Australian Government. Emergency Alert – National Telephone Warning System. – URL: https://www.emergencyalert.gov.au (дата звернення: 15.04.2025).
8. Federal Communications Commission (USA). Wireless Emergency Alerts (WEA) – FCC Consumer Guide. – URL: https://www.fcc.gov/consumers/guides/wireless-emergency-alerts-wea (дата звернення: 15.04.2025).
9. European Emergency Number Association (EENA). Public Warning in Europe: EECC Article 110 implementation. – 2022. – URL: https://eena.org/our-work/eena-special-focus/public-warning/ (дата звернення: 15.04.2025).

References:

1. Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporiadzhennia vid 31.01.2018 No. 43-r "Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku ta tekhnichnoi modernizatsii systemy tsentralizovanoho opovishchennia pro zahrozu vynyknennia abo vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii". – 2018. – Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/43-2018-р (Accessed: 15 April 2025).
2. Kabinet Ministriv Ukrainy. Rozporiadzhennia vid 11.07.2018 No. 488-r "Pro zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo realizatsii Kontseptsii rozvytku ta tekhnichnoi modernizatsii systemy tsentralizovanoho opovishchennia". – 2018. – Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/488-2018-р (Accessed: 15 April 2025).
3. Kabinet Ministriv Ukrainy. Postanova vid 27.09.2017 No. 733 "Pro zatverdzhennia Polozhennia pro orhanizatsiiu opovishchennia pro zahrozu vynyknennia abo vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii ta orhanizatsiiu zviazku u sferi tsyvilnoho zakhystu". – 2017. – Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2017-п (Accessed: 15 April 2025).
4. ZNI Kompani LLC. Stvorennia mistsevoi avtomatyzovanoi systemy opovishchennia ta zabezpechennia tsyvilnoho zakhystu naselennia m. Chernihiv: zvit. – Available at: [illegible] (Accessed: 15 April 2025).
5. Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy. Nakaz vid 08.02.2019 No. 93 "Pro zatverdzhennia Instruktsii shchodo proiektuvannia, vvedennia v ekspluatatsiiu, ekspluatatsii ta tekhnichnoho obsluhovuvannia avtomatyzovanykh system tsentralizovanoho opovishchennia". – 2019. – Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0418-19 (Accessed: 15 April 2025).
6. Demianchuk I.Ya. Opovishchennia naselennia velykykh mist pro zahrozu abo vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii: realizatsiia povnovazhen orhaniv upravlinnia // Efektyvnist derzhavnoho upravlinnia. – 2019. – No. 3(60), pp. 82–93.
7. Australian Government. Emergency Alert – National Telephone Warning System. – Available at: https://www.emergencyalert.gov.au (Accessed: 15 April 2025).
8. Federal Communications Commission (USA). Wireless Emergency Alerts (WEA) – FCC Consumer Guide. – Available at: https://www.fcc.gov/consumers/guides/wireless-emergency-alerts-wea (Accessed: 15 April 2025).
9. European Emergency Number Association (EENA). Public Warning in Europe: EECC Article 110 implementation. – 2022. – Available at: https://eena.org/our-work/eena-special-focus/public-warning/ (Accessed: 15 April 2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-13
УДК 004.9
Готович Володимир Анатолійович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-2143-6818
Максим'як Юрій Богданович, аспірант
https://orcid.org/0009-0008-2489-8659
Матійчук Любомир Павлович, д.е.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-6701-4683
Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, м. Тернопіль, Україна

ІННОВАЦІЙНІ ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІСЦЕВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОПОВІЩЕННЯ (МАСЦО)

Готович В. А., Максим'як Ю. Б., Матійчук Л. П. Інноваційні вектори розвитку програмного забезпечення місцевої автоматизованої системи централізованого оповіщення (МАСЦО). В роботі проведено системний аналіз потенціалу розвитку програмного забезпечення місцевої автоматизованих систем централізованого оповіщення (МАСЦО) шляхом впровадження сучасних цифрових технологій. Дослідження ґрунтується на основі публікацій вітчизняних, зокрема закордонних та практичного досвіду в сфері систем оповіщення, штучного інтелекту, IoT, Smart City, мобільних застосунків і блокчейн-технологій. На основі проведеного дослідження виокремлено п'ять інноваційних напрямів модернізації ПЗ МАСЦО: застосування штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання для інтелектуальної класифікації інтеграція системи з інфраструктурою Smart City; використання Інтернету речей (IoT) як мережі датчиків-тригерів; розробка мобільних застосунків та відкритих API для розширення кола та охоплення аудиторії; впровадження технології блокчейн для підвищення надійності та прозорості. Вперше комплексно розглянуто міждисциплінарний підхід до розвитку ПЗ МАСЦО, що охоплює ШІ, IoT, Smart City, мобільні технології та блокчейн. Програмне забезпечення МАСЦО слід розвивати як адаптивну платформу цифрової трансформації громад, здатну до самонавчання, автоматичного реагування та безпечної взаємодії з іншими системами. Необхідне державне стимулювання інновацій – нормативне, фінансове та організаційне – для впровадження розроблених напрямів у практику цивільного захисту.

Ключові слова: система оповіщень, інформування населення, місцеві автоматизовані системи централізованого оповіщення, МАСЦО, штучний інтелект, IoT, Smart City, мобільний застосунок, блокчейн-технологія.

Gotovych V., Maksymyak Yu., Matiychuk L. Innovative Vectors for the Development of Software for the Local Automated Centralized Notification System (LACNS). This paper conducts a systematic analysis of the potential development of software for the Local Automated Centralized Notification System (LACNS) through the implementation of modern digital technologies. The research is based on a review of scientific publications, technical documentation, and practical experience in the fields of notification systems, artificial intelligence, IoT, Smart City, mobile applications, and blockchain technologies. Based on the conducted research, five innovative directions for modernizing LACNS software have been identified: Application of artificial intelligence (AI) and machine learning to enhance notification intelligence; Integration of the system with Smart City infrastructure; Use of the Internet of Things (IoT) as a network of trigger sensors; Development of mobile applications and open APIs to expand notification channels; Implementation of blockchain technology to improve reliability and transparency. For the first time, a comprehensive interdisciplinary approach to the development of LACNS software has been considered, covering AI, IoT, Smart City, mobile technologies, and blockchain. The LACNS software should be developed as an adaptive platform for the digital transformation of communities, capable of self-learning, automatic response, and secure interaction with other systems. State incentives for innovation-regulatory, financial, and organizational-are necessary for implementing these directions in civil protection practices.

Keywords: notification system, public information, Local Automated Centralized Notification System (LACNS), artificial intelligence, IoT, Smart City, mobile application, blockchain technology.

Постановка наукової проблеми. Сучасні виклики – від стихійних лих до техногенних аварій і воєнних загроз – вимагають від систем оповіщення більшої інтелектуальності та інтегративності. Існуючі програмно-технічні комплекси оповіщення потребують модернізації через впровадження новітніх IT-рішень. Зокрема, актуальним є використання штучного інтелекту для інтелектуального аналізу даних про надзвичайні ситуації в режимі реального часу. Важливим напрямом є зв'язок МАСЦО з компонентами Smart City – міськими інформаційними системами, датчиками та пристроями керування інфраструктурою. Перспективи відкриває повсюдне впровадження Інтернету речей (Internet of Things, IoT) – мережі датчиків, що можуть автоматично генерувати сигнали тривоги. Паралельно, розвиток мобільних технологій дозволяє розробити дружні застосунки та відкриті API для покриття максимальної аудиторії та інтеграції різних платформ (наприклад, державних сервісів на кшталт «Дія»). Окремо слід зазначити потенціал

блокчейн-технологій у контексті систем оповіщення – вони можуть забезпечити незмінність і верифікованість повідомлень, прозорий аудит дій системи під час НС.

Мета роботи. Розкрити інноваційні напрями розвитку програмного забезпечення МАСЦО, що дозволять значно підвищити функціональність, надійність і адаптивність систем оповіщення. Для досягнення мети вирішуються такі завдання як аналіз можливості застосування ШІ/машинного навчання у програмному забезпеченні МАСЦО, дослідження шляхів інтеграції ПЗ оповіщення з концепцією Smart City, визначення ролі IoT як джерела автоматичних тригерів НС, оцінка переваг розробки мобільних застосунків та відкритих API для МАСЦО, з'ясування потенціалу блокчейн для забезпечення цілісності та довіри в системах оповіщення.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів досліджень. Проблематика оперативного оповіщення населення про надзвичайні ситуації (НС) є критичною для забезпечення безпеки громад. В Україні функціонує багаторівнева система оповіщення у сфері цивільного захисту, де місцева автоматизована система централізованого оповіщення (МАСЦО) відповідає за оповіщення на рівні територіальних громад, міст та селищ [1]. МАСЦО забезпечує передачу інформації на локальному рівні з метою оперативного попередження населення про можливі небезпеки [1]. Традиційно такі системи спираються на стаціонарні сирени, радіо- і телетрансляцію, однак у цифрову епоху зростають вимоги до їх функціональності, надійності й адаптивності.

Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання в системи оповіщення. Рис. 1 пропонує конкретні кроки впровадження ШІ та глибинного навчання у ПЗ МАСЦО.

Розвиток штучного інтелекту (ШІ) створює нові можливості для автоматизації та інтелектуалізації процесів оповіщення про надзвичайні ситуації. Глибинне навчання (deep learning) та інші методи машинного навчання дозволяють обробляти великі масиви даних у реальному часі і виявляти складні закономірності, недоступні традиційним алгоритмам. У контексті МАСЦО це означає, що система може навчитися розпізнати типи загроз, прогнозувати розвиток ситуації та пріоритизувати тривожні оповіщення.

За допомогою алгоритмів машинного зору та аналізу сигналів ШІ здатен автоматично розпізнавати ознаки різних надзвичайних ситуацій. Наприклад, система відеомоніторингу з навченою нейромережею може виявити ознаки лісової пожежі на ранній стадії (дим, вогонь) ще до того, як люди отримають повідомлення, і тим самим дати більше часу на реагування. У Каліфорнії вже використовують ШІ для аналізу зображень з камер спостереження з метою виявлення осередків займання лісу раніше за людину [2]. Аналогічно, акустичні сенсори, проаналізовані за допомогою глибинних нейромереж, можуть розрізняти звуки (наприклад, вибух, сирена, скло, що розбивається) та класифікувати подію як вибуховий інцидент, аварію чи акт вандалізму. Така класифікація в режимі реального часу забезпечує вибір правильного сценарію оповіщення для кожного типу загрози.

Рис. 1. Схема впровадження ШІ та глибинного навчання у ПЗ МАСЦО

Штучний інтелект здатен не лише виявити факт надзвичайної ситуації, а й швидко оцінити її можливі наслідки. Модель, натренована на даних про попередні надзвичайні події, може миттєво

спрогнозувати зону ураження або кількість потенційно постраждалих. Наприклад, при виявленні землетрусу визначеної магнітуди система на основі даних про забудову і населеність районів прогнозує ймовірні руйнування та потребу в евакуації. У випадку хімічної аварії алгоритми можуть оцінити напрямок розповсюдження небезпечних речовин (з урахуванням метеоданих) та згенерувати попередження для зон ураження. Таким чином, інтеграція моделей прогнозування в ПЗ МАСЦО дозволяє автоматично генерувати сценарії оповіщення з урахуванням очікуваних наслідків, що суттєво підвищує ефективність реагування.

В умовах одночасного надходження великої кількості сигналів (наприклад, множинні спрацювання датчиків або кілька паралельних НС) ШІ може допомогти визначити пріоритетність оповіщень. Машинне навчання здатне враховувати такі фактори, як масштаб загрози, достовірність джерела сигналу, густота населення в зоні ризику тощо, і на основі цього вирішувати, які оповіщення повинні бути надіслані негайно і яким каналом. Крім того, інтелектуальні фільтри на базі ML можуть відсіювати хибні спрацьовування датчиків або дублікати повідомлення, зменшуючи інформаційне навантаження на операторів та населення. В результаті система оповіщення стає більш надійною і сфокусованою на найбільш критичних загрозах.

Отже, впровадження ШІ та глибинного навчання у ПЗ МАСЦО дозволяє системі «навчитися думати» – самостійно розпізнавати типи загроз, прогнозувати розвиток подій і оптимально керувати потоком оповіщень. Це переводить оповіщення на якісно новий рівень *проактивності*, якщо традиційна система просто передає заздалегідь запрограмований сигнал, то інтелектуалізована система аналізує ситуацію і вибирає найдоречніший спосіб оповіщення для мінімізації наслідків НС. Важливо, що людський фактор не усувається повністю – найкращі результати дає співпраця ШІ та оператора, коли ШІ пропонує рішення, а людина-керівник НС затверджує або коригує їх на основі свого досвіду та контексту.

Доповіді свідчать, що вже нині можливе створення автоматизованих систем оповіщення, які самі генерують оповіщення на основі аналізу даних від зовнішніх джерел. Так, аналітики Deloitte описують концепцію, за якою ШІ-модуль приймає метеорологічні дані (наприклад, від Національного управління океанічних і атмосферних досліджень NOAA), проганяє їх через модель прогнозу погоди і автоматично формує серію попереджень для відповідних районів – тим самим мешканці отримують більше часу на підготовку до урагану чи іншого стихійного лиха[3]. Подібні рішення демонструють потенціал ШІ у підвищенні оперативності та точності систем оповіщення.

Інтеграція ПЗ МАСЦО з концепцією Smart City. Рис. 2 відображає схему інтеграції МАСЦО в цифрову інфраструктуру Smart City.

Концепція *Smart City* («розумного міста») передбачає застосування сучасних IT-рішень для управління міською інфраструктурою та сервісами з метою підвищення якості життя мешканців. Система оповіщення як критичний компонент безпеки міста повинна органічно інтегруватися в цю концепцію. Інтеграція МАСЦО зі Smart City означає взаємодію програмного забезпечення оповіщення з іншими міськими інформаційними платформами та керуючими пристроями в реальному часі.

У сучасних містах функціонують ситуаційні центри та платформи моніторингу (міський дата-центр, геоінформаційні системи, системи відеоспостереження тощо). ПЗ МАСЦО може бути підключене до єдиної міської платформи, отримуючи від неї аналітику і дані про інциденти. Навпаки, система оповіщення надає інформацію про активовані тривоги та їх статуси в міський центр управління. Така обмінна інтеграція забезпечує узгодженість дій: наприклад, якщо МАСЦО виявила загрозу і розпочала оповіщення, місто може автоматично перевести служби екстреного реагування у підвищену готовність, опираючись на сигнал від системи оповіщення. В ідеалі, МАСЦО стає частиною *єдиного інформаційного простору міста*, де всі системи "розмовляють однією мовою" через відкриті стандартизовані протокоди (наприклад, Common Alerting Protocol, CAP).

Інтеграція дозволяє МАСЦО безпосередньо задіяти *актуатори* міської інфраструктури для доведення сигналів та забезпечення безпеки. Зокрема, система оповіщення може автоматично вмикати електронні інформаційні табло на вулицях і в громадських місцях з відображенням повідомлень про небезпеку. Відомо, що у багатьох сучасних містах екстрені повідомлення можуть перебивати трансляцію реклами на цифрових білбордах та екранах, аби донести критичну інформацію до населення. Аналогічно, МАСЦО, інтегрована зі системою керування дорожнім рухом, може переводити світлофори в особливий режим під час евакуації (наприклад, відкривати

"зелену хвилю" на виїздах з небезпечної зони або блокувати в'їзд). Через інтеграцію з системами оповіщення громадського транспорту ПЗ МАСЦО може передавати екстрені оголошення безпосередньо в автобуси, тролейбуси, метро. Такий рівень взаємодії значно підвищує охоплення оповіщення і сприяє *скоординованій* евакуації *реагуванню* на рівні всього міста.

Рис. 2. Схема інтеграції МАСЦО в цифрову інфраструктуру Smart City

Концепція Smart City передбачає не лише передачу команд до пристроїв, а й збирання інформації від них (принцип двостороннього зв'язку). У випадку системи оповіщення це може проявляється у форм отримання підтверджень та даних від різних кінцевих точок. Наприклад, "розумні" інформаційні панелі можуть повідомляти в центр, чи успішно вони показали сигнал тривоги. Смарт-камери можуть надати зображення ситуації на евакуаційних шляхах в режимі реального часу для оцінки, як населення реагує на сигнали. Ба більше, мешканці міста через мобільні застосунки або спеціальні сенсори можуть надсилати зворотній сигнал (наприклад, кнопка екстреного виклику, підключена до міської мережі). Отримання такого фідбеку дозволяє оперативно коригувати дії: якщо з певного району масово надходять повідомлення від користувачів про відсутність сирен чи проблеми, система оповіщення може дублювати сигнал іншими каналами для цієї зони. За даними фахівців, сучасна система оповіщення має забезпечувати не лише передачу повідомлень в одне вікно, але й дати отримувачам можливість відповісти, надавши статус чи запит про допомогу [4]. Такий двосторонній обмін даними перетворює систему оповіщення з пасивного мовника на активний канал взаємодії влади та громади під час кризи.

Інтеграція систем оповіщення зі Smart City поступово здійснюється у провідних містах світу. В Сеулі та Токіо існують міські інформаційні системи, де сповіщення про землетруси або інші НС автоматично надходять на всі цифрові табло в метро, на зупинках та в торговельних центрах. У європейських містах запроваджується практика, коли сповіщення з міського центру цивільного захисту через API надходить до навігаційних систем автомобілів (інформуючи водіїв про надзвичайну ситуацію і рекомендовані дії). В Україні концепція "розумних міст" лише набирає обертів, але вже є приклади інтеграцій, зокрема, у Києві де міський ситуаційний центр, до якого планують підключити систему оповіщення для централізованого контролю сирен та інформування через міські сервіси.

Отже, синергія МАСЦО та Smart City відкриває можливості для швидкого й ефективнішого оповіщення. Система оповіщення перестає бути ізольованим інструментом, а стає частиною єдиної "нервової системи" міста. Це забезпечує комплексний підхід до безпеки: від автоматичного увімкнення засобів оповіщення до адаптивного керування міськими процесами під час НС. В результаті, мешканці отримують інформацію швидше та зручніше, рішення щодо реагування приймаються з урахуванням повної картини, а наслідки надзвичайних ситуацій мінімізуються завдяки злагодженим діям усіх елементів міської інфраструктури.

Інтернет речей (IoT) як джерело автоматичних тригерів НС. Рис. 3 відображає інтеграція IoT у програмне забезпечення МАСЦО

Рис. 3. Інтеграція IoT з програмне забезпечення МАСЦО

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це мережа фізичних пристроїв, обладнаних датчиками, підключених до Інтернету для збору і обміну даними. У сфері систем оповіщення IoT виконує роль "очей і вух" – тобто розгалуженої сенсорної інфраструктури, яка здатна автоматично виявляти ознаки небезпеки та генерувати сигнали тривоги без участі людини. Впровадження IoT-технологій у ПЗ МАСЦО дозволить реалізувати автоматичне спрацювання системи оповіщення при настанні певних умов (тригерів), що істотно скорочує затримку між виникненням надзвичайної ситуації та початком оповіщення.

Розосереджені датчики можуть безперервно контролювати критичні параметри довкілля та об'єктів. Серед найпоширеніших типів сенсорів, релевантних для НС:

- Датчики диму і вогню – виявляють займання, підвищення температури, полум'я; встановлюються в будівлях, лісах (протипожежні вежі з IoT), на промислових об'єктах.
- Газові сенсори – реєструють витік небезпечних газів (природного газу, хлору, аміаку тощо) на хімічних підприємствах, в газорозподільних мережах.
- Радіаційні датчики – контролюють рівень радіаційного фону, сигналізують про витік радіоактивних матеріалів або аварії на АЕС.
- Сейсмометри і датчики руху ґрунту – виявляють коливання земної поверхні, зсуви ґрунтів, передвісники землетрусів або обвалів.
- Гідрологічні датчики – вимірюють рівень води у річках, водосховищах, опади, важливі для попередження паводків.
- Датчики тиску та вібрації – можуть сигналізувати про вибухи або структурне руйнування будівель, шахтний обвал тощо.

Об'єднання таких сенсорів у єдину IoT-мережу і підключення її до МАСЦО створює систему раннього виявлення: як тільки якийсь показник перевищує безпечний поріг, сигнал від датчика через мережу передається на сервер ПЗ МАСЦО, де він інтерпретується як тривожна подія. В дослідженнях зазначається, що сучасні системи оповищення стають проактивними: вони покликані збирати дані з навколишнього середовища за допомогою необхідних інструментів (тобто датчиків), попереджати визначених отримувачів про небезпеку та навіть пропонувати необхідні дії[5]. Деякі системи, як підкреслюють автори, також активують автоматичні реакції на основі цих даних[5]. Таким чином, IoT виступає "нервовою системою" МАСЦО, що відчуває навколишнє середовище.

Головна перевага IoT-тригерів – швидкість реакції. На відміну від людини-оператора, який може не одразу помітити загрозу або зволікати з рішенням, автоматизований датчик подає сигнал миттєво при фіксації критичного параметру. Програмне забезпечення МАСЦО, отримавши такий сигнал, може самостійно привести в дію сценарій оповіщення, заздалегідь налаштований для цього типу тригера. Наприклад:

- Якщо кілька пожежних датчиків в будівлі спрацювали одночасно, система одразу надсилає оповіщення про пожежу: вмикає сирени у будівлі, відправляє повідомлення на телефони відповідальних осіб, повідомляє місцеву пожежну службу.

- Якщо сейсмограф зафіксував підземний поштовх заданої сили, автоматично активується протокол оповіщення про землетрус: звучать сирени у місті, приходять push-сповіщення жителям з інструкцією знайти безпечне місце.
- Якщо радіаційний фон на якомусь пості різко підвищився, система генерує тривогу про радіаційну небезпеку: спеціальні сигнали передаються на об'єкти критичної інфраструктури і населенню поблизу.
- Якщо датчики рівня води показують різкий підйом вгору за короткий час, МАСЦО запускає оповіщення про загрозу паводку в прибережних населених пунктах.

Таким чином, IoT дозволяє реалізувати принцип "машина повідомляє машину": сенсор -> мережа -> програма оповіщення -> виконавчі пристрої (сирени, SMS-шлюзи тощо). Людське втручання мінімізується на найкритичнішому етапі – етапі початкового виявлення і сигналізації. Це особливо важливо у випадку раптових подій (вибух, землетрус), де рахунок іде на секунди.

Окрім датчиків, до IoT-екосистеми можуть входити і пристрої, що виконують активні дії у відповідь на тригер. Наприклад, розумні замки можуть автоматично відчиняти аварійні виходи при отриманні сигналу пожежної тривоги від МАСЦО. Або система вентиляції на хімічному підприємстві автоматично вимикається при надходженні сигналу про витік газу. Такі автоматичні реакції тісно пов'язані з оповіщенням, фактично, вони є внутрішніми актами оповіщення машинами одна одну про потребу діяти. Досвід показує, що деякі сучасні системи оповіщення вже зараз можуть ініціювати подібні автоматизовані дії як частину свого сценарію реагування[5].

У ряді країн впроваджено інфраструктуру раннього виявлення землетрусів: тисячі сейсмодатчиків, з'єднаних у мережу, при перших поштовхах посилають сигнал у систему, яка за секунди розсилає оповіщення на смартфони і сирени (приклад – система ShakeAlert у США). В Японії та Каліфорнії існують мережі датчиків цунамі, що автоматично активують берегові сирени. Розумні лічильники газу в деяких країнах у разі землетрусу автоматично перекривають подачу газу та сигналізують мешканцям. У Нідерландах встановлено IoT-сенсори на греблях і дамбах, при небезпечному рівні води надходить автоматизоване оповіщення службам і населенню про загрозу підтоплення.

Таким чином, IoT як складова МАСЦО забезпечує принципово новий рівень автономності та оперативності системи оповіщення. Мережа сенсорів фактично перетворює все місто (або громаду) на єдиний "організм", що сам відчуває небезпеку і рефлекторно реагує на неї через систему оповіщення. Це суттєво доповнює традиційну схему, де людина мала помітити НС і вручну увімкнути сирени. Звичайно, виклики теж присутні – зокрема, важливо уникнути хибних спрацювань і забезпечити кібербезпеку IoT-пристроїв. Але перевага у вигляді виграного часу та ширшого охоплення загроз є надзвичайно вагомими. IoT-тригери роблять систему оповіщення проактивною, здатною почати діяти ще до того, як небезпеку усвідомили люди.

Мобільні застосунки та відкриті API для систем оповіщення

Сучасне суспільство значною мірою покладається на смартфони та інтернет-сервіси для отримання інформації. Це створює нові канали і інтерфейси для систем централізованого оповіщення. Розробка мобільних застосунків для оповіщення населення і надання відкритих API для інтеграції сторонніх платформ дозволяє значно розширити аудиторію та функціонал МАСЦО.

Спеціалізований мобільний додаток, підключений до системи оповіщення, може доставляти тривожні повідомлення безпосередньо у руку користувача – на екран смартфона чи планшета. На відміну від сирени або теле-/радіооголошення, таке повідомлення може містити детальну інформацію (текст, карту, інструкцію) і бути таргетовано під конкретне місцезнаходження. В Україні успішним прикладом є застосунок «Повітряна тривога», запущений у 2022 році, який сповіщає громадян про початок та відбій повітряних, хімічних, техногенних та інших тривог системи цивільної оборони в режимі push-нотифікацій. Цей додаток був швидко впроваджений і довів свою ефективність, рятуючи життя під час ракетних обстрілів. Надалі функціонал мобільних застосунків може розширюватися, наприклад, надання користувачу можливості відповіді – підтвердити, що він у безпеці, або повідомити про надзвичайну ситуацію, тим самим утворюючи двосторонній канал (як згадувалося раніше, це покращує зворотний зв'язок). Мобільні додатки можуть враховувати геолокацію користувача і показувати лише релевантні тривоги для його району (щоб не перевантажувати зайвими сповіщеннями). Вони також можуть мати режим роботи офлайн (буферизація останнього сповіщення) на випадок втрати інтернет-зв'язку.

Для розширення охоплення, систему оповіщення варто підключати до тих цифрових ресурсів, якими масово користуються громадяни. В українському контексті стратегічно важливою є інтеграція сповіщень із додатком «Дія» – єдиним державним порталом електронних послуг, аудиторія якого сягає десятків мільйонів. Вже зроблені кроки у цьому напрямку: критичні повідомлення (зокрема, сповіщення про ракетну небезпеку) надходять користувачам Дії у вигляді спеціальних попереджень. Крім того, варто інтегрувати МАСЦО з Єдиною системою цивільного захисту (наприклад, якщо існує національна платформа оповіщення або центр, відомий як ЄОСМС – умовно, єдина область/оперативна система мобільного сповіщення). Інтеграція може здійснюватися через відкриті API або webhook-запити: коли МАСЦО генерує подію тривоги, зареєстровані зовнішні платформи отримують через API відповідне повідомлення і можуть його ретранслювати своїми каналами. Таким чином, офіційні застосунки, сайти органів влади, месенджери, соціальні мережі можуть слугувати додатковими ретрансляторами сигналів оповіщення. Принцип "єдиного вікна" для користувача (отримання всіх важливих держповідомлень у одному додатку) підвищує ймовірність того, що попередження не залишиться непоміченим.

Надання відкритого програмного інтерфейсу (API) до системи оповіщення дозволяє сторонніх розробникам та сервісам інтегруватися з нею. Це стимулює інновації на місцевому рівні. Наприклад, локальні системи оповіщення підприємств чи університетів можуть через API автоматично отримувати сигнали від МАСЦО (про міські чи регіональні загрози) і дублювати їх на своїх територіях. Навпаки, вони ж можуть надсилати в МАСЦО інформацію про свої локальні НС, щоб ті були враховані на загальному рівні. Громадські розробники можуть створювати спеціалізовані застосунки для людей з інвалідністю, підключені до API МАСЦО (наприклад, програми, що при отриманні сигналу вібрують чи блимають на смарт-годиннику для людей з вадами слуху). Відкритий API також дозволяє легко інтегрувати нові канали оповіщення, що з'являються з розвитком технологій: скажімо, в майбутньому це можуть бути розумні колонки (voice assistants), які через API отримають повідомлення і голосом попередять мешканців оселі про небезпеку.

Варто зазначити, що мобільні та інтернет-канали оповіщення доповнюють, але не замінюють традиційні засоби. Адже у разі кібератаки або перебоїв з електроживленням мобільний зв'язок може постраждати. Тому архітектура сучасної системи оповіщення має бути багатоканальною (multi-channel): сирени, радіо, телебачення, мобільні додатки, SMS, месенджери тощо – все працює в комплексі, підвищуючи ймовірність доведення сигналу. Дослідники наголошують, що мультимодальність і масштабованість є ключовими характеристиками системи оповіщення [4]. Система повинна вміти масштабуватися під навантаження (розсилати мільйони повідомлень, не втрачаючи швидкості) та легко додавати нові канали зв'язку по мірі розвитку технологій [4]. Мобільні рішення якраз добре масштабуються хмарними засобами і можуть динамічно адаптуватися.

Отже, розробка мобільних застосунків та відкритих API для МАСЦО є важливим кроком на шляху людино-центричного і гнучкого оповіщення. Це забезпечує доставку сигналів туди, де люди проводять більшість часу – в онлайн-простір та смартфони. Відкритість платформи для інтеграції стимулює появу нових сервісів і підвищує загальну стійкість системи. В умовах цифрової трансформації громад такі підходи дозволяють максимально наблизити систему оповіщення до кожної окремої особи, враховуючи її потреби та поведінку.

Технології блокчейн у системах оповіщення

Блокчейн асоціюється передусім з криптовалютами, але його властивості – децентралізованість, незмінність даних, прозорість – можуть бути використані для підвищення надійності систем оповіщення. Блокчейн – це розподілений реєстр, у якому інформація зберігається у вигляді ланцюжка блоків, захищених криптографічними методами. В контексті ІПЗ МАСЦО блокчейн-технології відкривають такі перспективи: створення незмінного логу подій оповіщення, забезпечення довіри до сигналів (захист від фальшивих або несанкціонованих тривог), впровадження смарт-контрактів для автоматизації протоколів реагування, а також покращення координації між різними організаціями.

Кожен факт активації оповіщення, передавання повідомлення чи інша подія може записуватися у блокчейн-реєстр. Завдяки криптографічному зв'язуванню блоків забезпечується, що запис неможливо жодним чином змінити або видалити – будь-яка спроба правки буде відразу помітна. Це надзвичайно корисно для аудиту та розслідувань після НС: всі дії системи оповіщення документовані і їхня достовірність гарантована технологією. Наприклад, після надзвичайної

ситуації можна перевірити точний час увімкнення сирени в кожному районі чи момент відправки SMS-повідомлення – якщо ці дані у блокчейні, то вони однозначно правдиві. Такий журнал може бути відкритим (публічний блокчейн) або доступним для уповноважених органів (приватний або консорціумний блокчейн). Експерти з блокчейну зазначають, що immutable audit trail – одна з ключових переваг: кожна транзакція (дія) записана з міткою часу, формуючи незмінний ланцюжок подій, що дуже важливо для юридичної та управлінської відповідальності[6].

Класичні системи оповіщення залежать від центрального сервера або центру керування. Якщо він виходить з ладу (через збій або атаку), вся система може припинити роботу. Блокчейн же за своєю природою децентралізований: інформація зберігається і обробляється на множині вузлів мережі. У випадку децентралізованої системи оповіщення на блокчейні, сигнал тривоги може ініціюватися та поширюватися відразу через багаточисельні вузли, що підвищує виживаність системи в кризових ситуаціях. Дослідники пропонують концепцію EmergencyBlock – блокчейн-базованої системи публічного оповіщення, що має децентралізовану архітектуру і завдяки цьому зберігає працездатність при високих навантаженнях або пошкодженні частини інфраструктури. Розподілені вузли, розміщені в різних організаціях (ДСНС, оператори зв'язку, місцева влада тощо), спільно підтверджують і поширюють повідомлення тривоги. Це також унеможливлює одноосібне блокування чи цензурування сповіщень – влада нижчого рівня чи зловмисник не можуть приховати або сфальсифікувати сигнал, адже його автентичність захищена консенсусом мережі.

Уявімо ризик: зловмисник намагається передати неправдивий сигнал тривоги, зламавши систему, або внутрішній диспетчер зловживає повноваженнями. Блокчейн може запобігти цьому через механізм криптографічної перевірки кожної транзакції (події оповіщення). Кожен вузол або особа, уповноважена генерувати сигнал в МАСЦО, матиме свій криптографічний ключ. Тільки транзакції, підписані належним ключем, будуть вважатися дійсними і включатися до блокчейну. Всі інші – відкидатимуться. Це означає, що сторонній несанкціонований сигнал просто не потрапить до системи. Крім того, сам блокчейн-реєстр дозволяє перевірити цілісність повідомлення: якщо хтось спробує його змінити по дорозі (наприклад, замінити текст або район оповіщення), хеш-перевірка блоку покаже невідповідність. Науковці пропонують використовувати асиметричне шифрування в парі з блокчейном для гарантії, що фальшиві тривоги неможливі, а всі справжні сповіщення захищені від підробки. Таким чином, громадяни і посадовці можуть більше довіряти системі: якщо прийшло повідомлення, то воно точно від справжнього джерела і не було змінене.

Смарт-контракт – це програма, що виконується в блокчейн-мережі автоматично при виконанні заданих умов. В контексті МАСЦО смарт-контракти можуть застосовуватися для формалізації та автоматизації протоколів реагування. Наприклад, можна створити смарт-контракт «Якщо від сенсорної мережі X надходить підтверджений сигнал про землетрус магнітудою > 6, то: 1) додати запис про надзвичайну ситуацію до блокчейну; 2) оповістити такі-то вузли (місто, область) про необхідність увімкнення сирен; 3) після підтвердження від >=2 вузлів – згенерувати транзакцію про початок оповіщення і виконати розсилку сповіщень через API». Цей умовний сценарій виконається автоматично і прозоро – всі учасники бачать на блокчейні, що умови виконано і контракт спрацював. Смарт-контракти можуть керувати розподілом ресурсів: наприклад, автоматично розблокувати доступ до резервних каналів зв'язку при великій надзвичайній ситуації, або навіть ініціювати страхові виплати/допомогу населенню після фіксації блоку про НС (це ширший міжвідомчий аспект). Хоча використання смарт-контрактів у цій галузі поки експериментальне, потенціал великий – вони усувають затримки і людський фактор у виконанні узгоджених протоколів, гарантуючи, що «кодекс дій» буде дотриманий до літери.

Під час ліквідації наслідків НС взаємодіє багато суб'єктів: служби ДСНС, поліція, медики, енергокомпанії, органи місцевої влади тощо. Кожен з них має свої дані і системи. Блокчейн може слугувати єдиним достовірним інформаційним полем для різних учасників, де вони обмінюються даними про інцидент. Наприклад, у разі великої техногенної аварії одна сторона (підприємство) записує у блокчейн параметри аварії, друга (ДСНС) – свої дії та потреби, третя (лікарні) – інформацію про постраждалих. Усі бачать актуальну інформацію і впевнені в її достовірності, бо вона верифікована в розподіленій мережі. У Китаї досліджується застосування блокчейну для спільного використання даних під час надзвичайних ситуацій у сфері охорони здоров'я (наприклад, при епідеміях) – побудовано консорціумний блокчейн, де різні відомства діляться даними про розвиток ситуації, що підвищує ефективність координації. Аналогічно, для МАСЦО блокчейн може об'єднати різні рівні систем оповіщення (державну, регіональну, місцеву) у єдиний захищений

контур обміну сигналами – кожен рівень є вузлом мережі і публікує свої оповіщення, які підтверджуються іншими.

Отже, застосування блокчейн-технологій у ПЗ МАСЦО спрямоване на підвищення довіри, надійності та автоматизації. Децентралізована архітектура забезпечує стійкість системи до відмов і атак, а незмінність даних гарантує прозорість та підзвітність. Хоча впровадження блокчейну потребує додаткових ресурсів і координації (а також вирішення питань конфіденційності даних), потенційний виграш – дуже значний. Уявлення про систему оповіщення як довірену платформу, де кожен сигнал завірений і зберігається назавжди, доповнює концепцію цифрової трансформації сфери безпеки. Блокчейн може стати тим "каркасом довіри", на якому будуть реалізовані міжвідомчі та міжрегіональні взаємодії в надзвичайних ситуаціях.

Напрями дослідження та перспективи розвитку. Сучасні виклики безпеки вимагають трансформації місцевих систем централізованого оповіщення з традиційних сиренних комплексів у адаптивні цифрові платформи, здатні навчатися, взаємодіяти та еволюціонувати. Проведений аналіз окреслив п'ять ключових векторів інноваційного розвитку програмного забезпечення МАСЦО:

1. Інтелектуалізація оповіщення (ШІ та ML). Оснащення ПЗ МАСЦО алгоритмами штучного інтелекту дає можливість системі автоматично розпізнавати типи надзвичайних ситуацій, прогнозувати їхні наслідки і оптимально керувати потоками оповіщень. Інтелектуальна система оповіщення переходить від реактивної моделі "сповістити про те, що сталося" до проактивної моделі "передбачити та попередити, поки не пізно". Це значно підвищує ефективність оповіщення і зменшує втрати під час НС завдяки виграному часу та точнішій інформації.

2. Інтеграція з екосистемою Smart City. ПЗ МАСЦО повинно стати невід'ємною частиною цифрової інфраструктури громади. Інтеграція зі смарт-платформами міста дозволяє автоматизовано задіяти інформаційні табло, транспорт, системи зв'язку та інші ресурси для донесення оповіщення і забезпечення заходів реагування (евакуація, пріоритетні маршрути тощо). Одночасно, через міські датчики та пристрої, система може отримувати зворотний зв'язок про стан виконання оповіщення. Така тісна взаємодія забезпечує синергетичний ефект – ціле (розумне місто) реагує на загрозу як єдиний організм, мінімізуючи хаос і затримки.

3. IoT-орієнтованість (автоматичні тригери). Вбудовування в МАСЦО численних IoT-датчиків створює мережу раннього виявлення, яка миттєво запускає оповіщення при прояві ознак небезпеки. Система отримує "сенсори" для різних видів загроз – від природних (землетрус, повінь) до техногенних (пожежа, хімічний витік) – і може реагувати в автономному режимі. Це особливо важливо для раптових, стрімких НС, де людський ресурс може не встигнути зреагувати. IoT робить оповіщення більш точним (адже сигнали генеруються на основі виміряних параметрів) та оперативним. Водночас, важливою є кібербезпека IoT-середовища, щоб виключити саботаж або масові хибні спрацьовування.

4. Мобільність та відкритість платформи. Розробка дружніх користувацьких мобільних застосунків підвищує довіру населення до системи оповіщення і залученість у процес підготовки до НС. Мобільні канали дозволяють персоналізувати попередження і донести їх навіть до тих, хто може не почути сирен. Відкриті API та інтеграція з популярними сервісами (як-от "Дія") роблять МАСЦО гнучкою екосистемою, яку можна адаптувати під різні потреби громад та організацій. Залучення сторонніх розробників через API стимулює інновації і створення додаткових корисних сервісів навколо оповіщення – від віджетів погоди з функцією тривоги до систем оповіщення усередині розумних будинків. Таким чином, МАСЦО еволюціонує у платформу цивільної безпеки, на основі якої розбудовується цілий ряд цифрових рішень для громад.

5. Блокчейн та довіра. Впровадження блокчейн-рішень сприяє вирішенню проблеми довіри і прозорості. У критичних системах, до яких належить оповіщення, надзвичайно важливо мати гарантії, що інформація достовірна і процеси відбулися так, як заявлено. Блокчейн забезпечує незмінність записів про оповіщення, унеможливлює приховування чи фальсифікацію подій, надає механізми колективної верифікації сигналів. В довгостроковій перспективі це може стати основою для міжрегіональної та міжнародної взаємодії систем оповіщення, коли різні юрисдикції довіряють сигналам одна одної на основі спільного розподіленого реєстру. Смарт-контракти ж можуть зробити реагування більш автоматичним і об'єктивним, зменшуючи адміністративні затримки.

Висновки. Розвиток ПЗ МАСЦО на етапі цих п'яти напрямів охоплює кілька галузей: штучний інтелект, інформаційні технології міського управління, телекомунікації, сенсорні мережі, кібербезпеку, розробку програмного забезпечення, криптографію тощо. Це яскраво ілюструє, що

сучасні системи оповіщення виходять за рамки суто інженерних задач зв'язку – вони перетворюються на кібер-фізичні системи, які поєднують технічні засоби і алгоритми ухвалення рішень. Для успішної реалізації таких проектів потрібна співпраця фахівців різних напрямів: айтішників, рятувальників, місцевих плавувальників, законодавців. Саме міждисциплінарний підхід забезпечить створення збалансованої системи, де технології відповідають реальним потребам цивільного захисту і можуть бути ефективно використані службами ІНС.

Враховуючи стратегічне значення МАСЦО для безпеки громад, доцільно на державному рівні стимулювати впровадження розглянутих інновацій. По-перше, необхідно оновити нормативно-правову базу: стандартизувати формати даних для оповіщення (наприклад, адаптувати міжнародний стандарт CAP під українські реалії), визначити вимоги до кібербезпеки систем оповіщення, узаконити використання мобільних сповіщень нарівні з сиреною, врегулювати питання відповідальності при автоматизованих рішеннях (смарт-контракти). По-друге, слід реалізувати пілотні проекти в окремих громадах з впровадженням, наприклад, IoT-мережі повсюдних датчиків або AI-модуля аналізу відеопотоків для оповіщення – і на їх результатами масштабувати успішні рішення. По-третє, необхідна державна підтримка фінансування і стимулювання бізнесу: закупівля необхідного обладнання (генератори, сервери), гранти на розробку ПЗ (застосунків, блокчейн-систем), залучення вітчизняних IT-компаній до розробки компонентів МАСЦО.

У рамках цифрової трансформації суспільства, про яку заявлено на найвищому рівні, система оповіщення має трансформуватися одною з перших – адже вона безпосередньо пов'язана з захистом життя людей. Інвестиції ПЗ МАСЦО – це інвестиція у безпеку і стійкість громад до будь-яких викликів. Наведені напрями розвитку демонструють, що вже існують технологічні рішення для створення розумної, надійної та гнучкої системи оповіщення. Важливо об'єднати зусилля науковців, розробників і держави, щоб в найближчі роки ці рішення перейшли з площини концепцій та пілотів у реальну практику цивільного захисту по всій країні.

Список бібліографічного списку

1. Нова система оповіщення за рівнями // Телеканал-Сервіс. [сайт]. – Режим доступу: https://t.kiev.ua/novaya-sistema-opovescheniya-po-urovnyam/ (дата звернення: 02.05.2025).
2. Leveraging AI in emergency management and crisis response // Deloitte Insights. [веб-сайт]. – Режим доступу: https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/public-sector/automation-and-generative-ai-in-government/leveraging-ai-in-emergency-management-and-crisis-response.html (дата звернення: 02.05.2025).
3. Villegas-Ch, W.; Govea, J. Application of Deep Learning in the Early Detection of Emergency Situations and Security Monitoring in Public Spaces // Applied System Innovation. – 2023. – Vol. 6, No. 5. – P. 90. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2571-5577/6/5/90 (дата звернення: 02.05.2025).
4. What Essential Features Must an Emergency Notification System Maintain? // GovCIO Outlook. [веб-сайт]. – 14 жовтня 2024. – Режим доступу: https://www.govcioutlook.com/news/what-essential-features-must-an-emergency-notification-system-maintain-nid-2296.html (дата звернення: 02.05.2025).
5. Oluwafemi T. O. та ін. SEN-IoT: A Smart Emergency Notification System Suitable for Developing Countries using Internet of Things // International Journal of Computer (IJC). – 2020. – Vol. 39, No. 1. – P. 1–9. – Режим доступу: https://ijcjournal.org/index.php/InternationalJournalOfComputer/article/view/1082 (дата звернення: 02.05.2025).
6. Emergency Care Blockchain Solution – Startup Spotlight // FasterCapital Blog. [веб-сайт]. – Режим доступу: https://fastercapital.com/content/Emergency-Care-Blockchain-Solution--Startup-Spotlight--Blockchain-Solutions-for-Rapid-Emergency-Response.html (дата звернення: 02.05.2025).

References:

1. Novaya sistema opovescheniya za urovnyami // Telekanal-Servis. https://t.kiev.ua/novaya-sistema-opovescheniya-po-urovnyam/ (access date: 02.05.2025).
2. Leveraging AI in emergency management and crisis response // Deloitte Insights. https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/public-sector/automation-and-generative-ai-in-government/leveraging-ai-in-emergency-management-and-crisis-response.html (access date: 02.05.2025).
3. Villegas-Ch, W.; Govea, J. Application of Deep Learning in the Early Detection of Emergency Situations and Security Monitoring in Public Spaces // Applied System Innovation. – 2023. – Vol. 6, No. 5. – P. 90. https://www.mdpi.com/2571-5577/6/5/90 (access date: 02.05.2025).
4. What Essential Features Must an Emergency Notification System Maintain? // GovCIO Outlook. https://www.govcioutlook.com/news/what-essential-features-must-an-emergency-notification-system-maintain-nid-2296.html (access date: 02.05.2025).
5. Oluwafemi T. O. та ін. SEN-IoT: A Smart Emergency Notification System Suitable for Developing Countries using Internet of Things // International Journal of Computer (IJC). – 2020. – Vol. 39, No. 1. – P. 1–9. https://ijcjournal.org/index.php/InternationalJournalOfComputer/article/view/1082 (access date: 02.05.2025).
6. Emergency Care Blockchain Solution – Startup Spotlight // FasterCapital Blog. https://fastercapital.com/content/Emergency-Care-Blockchain-Solution--Startup-Spotlight--Blockchain-Solutions-for-Rapid-Emergency-Response.html (access date: 02.05.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-14
УДК 004.056.5
Держач Марина Володимирівна[1,2], к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-8977-2776
Кондратенко Роман Андрійович[3], студент
https://orcid.org/0009-0005-7264-0645
Барбарук Віктор Миколайович[2], к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-9558-0865
[1]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна,
[2]Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ, Україна,
[3]Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ФОРМУВАННЯ СОЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ ОСОБИСТОСТІ ЗАВДЯКИ OSINT-ТЕХНОЛОГІЇ

Держач М. В., Кондратенко Р. А., Барбарук В. М. Інформаційна система формування соціального профілю особистості завдяки OSINT-технологій. Зростання обсягу даних, доступних в онлайн-джерелах, створює нові можливості в різних сферах діяльності та сприяє виявленню закономірностей, трендів та знань, що є підґрунтям для розробок. У статті представлений розроблена інформаційна система формування соціального профілю особистості завдяки OSINT-технології, яка забезпечує комплексний підхід до збору, обробки, захисту даних з популярного месенджера Telegram. Використання бібліотеки WTelegramClient дозволило забезпечити надійний та зручний спосіб взаємодії з Telegram API для ефективного збору різних типів даних, включаючи текстові повідомлення, медіа-файли та веб-посилання. Для забезпечення конфіденційності та безпеки даних передбачено кілька рівнів захисту. Використано криптографічний протокол SSL, який забезпечує зашифрований канал зв'язку між клієнтом і сервером. Власний протокол месенджера MTProto гарантує безпечну передачу даних у межах Telegram. Для зберігання даних використано базу даних MSSQL, яка також підтримує належне управління автентифікацією/авторизацією, шифрування даних. Інтерфейс, створений на основі Angular та фреймворку, інтуїтивно зрозумілий, дозволяє легко візуалізувати та аналізувати зібрані дані, надає доступ до всіх функціональних можливостей розробленої системи. Загалом, інформаційна система формування соціального профілю особистості забезпечує зручну та ефективну роботу з великими обсягами інформації, надаючи користувачам можливість працювати з конфіденційною інформацією у безпечному середовищі.
Ключові слова: інформаційна система, OSINT-технології, кібербезпека, конфіденційність, шифрування.

Derkach M., Kondratenko R., Barbaruk V. Information system for forming a social profile of an individual using OSINT technologies. The growth of the volume of data available in public sources creates new opportunities in various fields of activity and contributes to the identification of patterns, trends and knowledge, which is the basis for development. The article presents the developed information system for forming a social profile of an individual thanks to OSINT technology, which provides a comprehensive approach to collecting, processing and protecting data from the popular Telegram messenger. The use of the WTelegramClient library made it possible to provide a reliable and convenient way of interacting with the Telegram API for the effective collection of various types of data, including text messages, media files and web links. To ensure confidentiality and security of data, several levels of protection have been implemented. The SSL cryptographic protocol is used for data encryption, which provides a secure communication channel between the client and the server. The messenger's own MTProto protocol guarantees secure data transmission within Telegram. The MSSQL database is used to store data, which also supports a secure connection, authentication/authorization, and data encryption. The interface, created based on Angular and sparkling, is intuitive, allows easy visualization and analysis of collected data, provides access to all the functionalities of the developed system. In general, the information system for forming a social profile of a person provides convenient and effective work with large amounts of information, giving users the opportunity to work with confidential information in a secure environment.
Keywords: information system, OSINT technologies, cybersecurity, privacy, encryption.

Постановка проблеми. У сучасному цифровому суспільстві величезна кількість даних про особистість доступна з відкритих джерел – соціальних мереж, вебсайтів, форумів, блогів, баз даних, медіа, публічних реєстрів тощо [1]. Це створює для організацій, служб безпеки, HR-підділів, аналітиків, як нові можливості — аналіз репутацій, підвищення кібербезпеки, так і ризики — маніпуляції, порушення приватності. Тому у світі, де інформація стає ключем до успіху, зростає потреба в ефективних інструментах для збору та аналізу даних про особистість. Технології OSINT (Open Source Intelligence – розвідка з відкритих джерел) дозволяють ефективно збирати, обробляти та аналізувати дані. Наразі існують такі популярні системи формування соціального профілю особистості на основі OSINT-технологій, як Fama, Hootsuite Insights, Mention, Talkwalker, Socialbakers та Falcon. Водночас, більшість існуючих інформаційних систем не забезпечують достатньо точного, комплексного й структурованого аналізу особистих даних із відкритих джерел. В умовах кіберзагроз, дезінформації та соціальної інженерії важливо створювати інформаційні системи, які дозволяють формувати єдиний, структурований соціальний профіль особистості на

основі достовірних відкритих джерел, забезпечуючи при цьому релевантність та етичність обробки інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так у дослідженні [2] представлено систему на основі OSSINT, яка дозволяє виявляти приховану інформацію в профілях користувачів соціальних мереж, зокрема Facebook. Система аналізує мережу друзів користувача та може передбачати нові зв'язки, що дозволяє інферувати особисті дані, які користувач вважав приватними. Автори статті [3] пропонують класифікацію даних та інструментів OSINT, пов'язаних з ідентичністю, що допомагає систематично шукати та аналізувати дані для виявлення можливих векторів атак та прийняття контрзаходів. Дослідження [4] пропонує метод виявлення підозрілої поведінки користувачів Facebook за допомогою машинного навчання та OSINT, що може бути корисним для безпекових організацій у прогнозуванні внутрішніх загроз. У статті [5] представлено гнучкий фреймворк для масштабування OSINT-розслідувань за допомогою краудсорсингу, що дозволяє ефективно залучати новачків до підтримки професійних розслідувань.

Аналіз публікацій підтверджує, що розробка подібних систем є актуальною задачею, і як для кібербезпеки, так і для кадрового аналізу, антикорупційної діяльності, цифрової безпеки та досліджень у соціальній сфері

Метою статті є розроблення інформаційної системи формування соціального профілю особистості для збору, аналізу та візуалізації даних з онлайн-джерел, таких як чати, канали, групи та форуми завдяки OSINT-технологій.

Вирішення проблеми. Одним з основних джерел інформації став такий популярний месенджер, як Telegram, що надає можливість створення як публічних, так і приватних каналів та груп. Згідно з дослідженням платформи Statista, станом на лютий 2025 року кількість активних користувачів Telegram перевищує 950 мільйонів на місяць, з яких значна частина використовує месенджер для обміну конфіденційною інформацією та участі в спеціалізованих групах. Це робить Telegram цінним джерелом для дослідження сучасних кіберзагроз та методів захисту від них.

Збір даних є критичним етапом у будь-якому дослідженні, оскільки саме від якості зібраної інформації залежить точність і надійність результатів. Існує кілька ключових технологій OSINT розвідки, таких як використання скраперів веб-сторінок, API соціальних мереж та інструментів аналізу тексту.

Отже, розроблена інформаційна система автоматизує процес збору даних завдяки бібліотеці WTelegramClient, забезпечуючи їх регулярне оновлення та збереження, використовуючи запити до Telegram API для отримання повідомлень, інформації про учасників груп і каналів, а також іншої корисної інформації: відправник, чат, медіа файли, текст, вебпосилання та метадані [6]. Це дозволяє швидко збирати великі обсяги даних для подальшого аналізу, фільтрації та відправки даних до сховища. Telegram API використовує свій власний криптографічний протокол MTProto [7], який забезпечує потокове шифрування перед взаємодією клієнтів з сервером завдяки REST API.

Наприклад, для отримання вмісту чату потрібно викликати функцію з необхідними параметрами та отримати результат. У MTProto TL-схема (мова типів, що використовуються API, для представлення огородженних типів і функцій) буде серіалізована у двійковий формат, перш ніж вона буде вбудована як корисне навантаження повідомлень

Лістинг 1. TL-схема прикладу

```
auth.sentCode#efed51d9 phone_registered:Bool phone_code_hash:string
send_call_timeout:int is_password:Bool =
auth.SentCode;auth.sentAppCode#e325edcf phone_registered:Bool
phone_code_hash:string send_call_timeout:int is_password:Bool =
auth.SentCode;---functions---auth.sendCode#768d5f4d phone_number:string
sms_type:int api_id:int api_hash:string lang_code:string = auth.SentCode;
```

Таким чином, використання Telegram API є оптимальним рішенням для збору даних з Telegram, забезпечуючи ефективність, точність і безпеку процесу. Саме забезпечення конфіденційності та безпеки даних є одним з найважливіших аспектів, особливо тому, що мова йде про обробку та зберігання особистої інформації користувачів. У розробленій інформаційній системі застосовуються декілька рівнів захисту, оскільки разом з MTProto використовується криптографічний протокол SSL (Secure Sockets Layer), що забезпечує захищений канал зв'язку між

клієнтом і сервером. Він використовується для шифрування даних, що передаються через Інтернет, запобігаючи їх перехопленню та несанкціонованому доступу.

Архітектура розробки, зображена на рисунку 1, також передбачає сховище даних та інтерфейс користувача, що забезпечує користувачам доступ до візуалізації даних, пошуку, фільтрації, групуванню, тощо. Ця архітектура є гнучкою та може бути розширена за рахунок додавання нових компонентів та функціональних можливостей.

В якості сховища даних використано базу даних Microsoft SQL Server (MSSQL), для комунікації та генерації міграцій для бази даних застосовано фреймворк об'єктно-реляційного відображення (ORM) з відкритим вихідним кодом Entity Framework Core. Основні заходи захисту, що застосовуються до бази даних MSSQL, включають:

1. Доступ до бази даних здійснюється через захищене з'єднання, яке шифрує всі дані, що передаються між системою і базою даних.
2. Доступ до бази даних захищений паролем, який забезпечує, що тільки авторизовані користувачі можуть отримати доступ до конфіденційної інформації. Крім того, використовуються механізми контролю доступу, які обмежують права користувачів і дозволяють доступ лише до тих даних, що їм необхідні для виконання своїх завдань.
3. MSSQL підтримує шифрування даних як на рівні бази даних, так і на рівні окремих таблиць й стовпців. Це дозволяє забезпечити додатковий рівень захисту для конфіденційної інформації, навіть якщо зловмисники отримають доступ до фізичних файлів бази даних.

Завдяки використанню SSL для захисту передачі даних, MTProto для захищеної комунікації у Telegram, а також надійних заходів безпеки в базі даних MSSQL, інформаційна система забезпечує високий рівень захисту конфіденційності та безпеки даних користувачів. Ці заходи гарантують, що всі дані залишаються захищеними від несанкціонованого доступу та зловживань, забезпечуючи надійність та довіру до розробки.

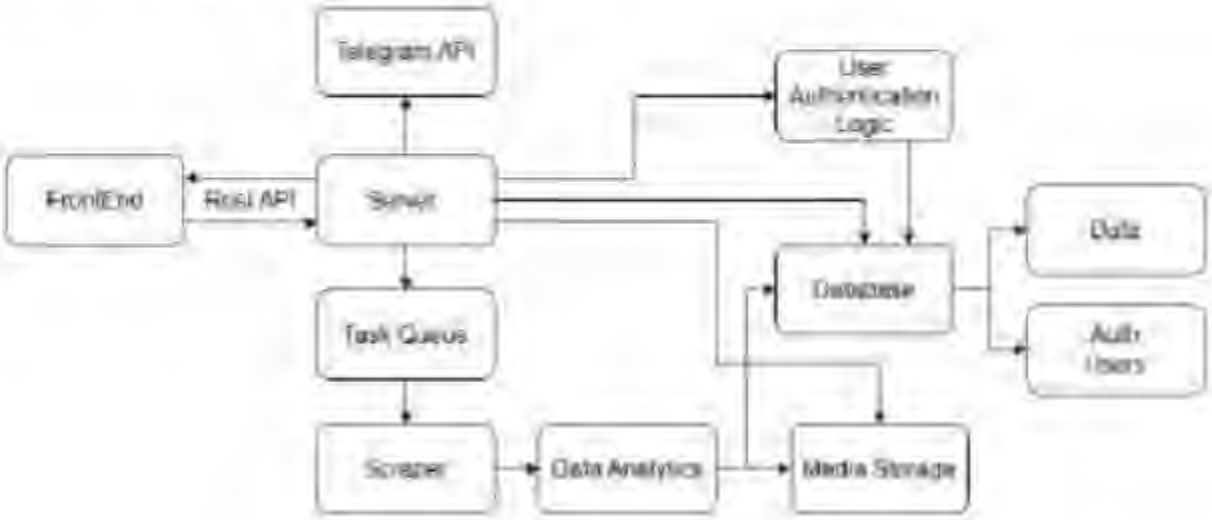


Рис. 1 – Архітектура інформаційної системи

Ще одним критично важливим етапом є розробка інтерфейсу користувача, який є простим у використанні як для досвідчених користувачів, так і для початківців, надаючи можливість візуалізувати зібрані та проаналізовані дані.

Для цього використано фреймворк Angular у поєднанні з бібліотекою компонентів spartan ng для створення сучасного, інтерактивного та продуктивного інтерфейсу користувача. Angular забезпечує модульність, повторне використання коду та інтеграцію з багатьма іншими бібліотеками та інструментами, а також використовуючи Angular, створено рефлективний інтерфейс, який автоматично оновлюються у відповідь на зміни даних. Це означає, що користувачі зможуть бачити актуальні дані в режимі реального часу, без необхідності перезавантажувати сторінку. Бібліотека spartan ng надає широкий набір готових компонентів, таких як таблиці, форми, кнопки та навігаційні панелі, що дозволило швидко створити інтуїтивно зрозумілі елементи інтерфейсу, які відповідають сучасним стандартам дизайну та забезпечують високий рівень користувацького досвіду.

Результати тестування. Для проведення тестування підготовлено акаунт, що використано для збору важливих або чутливих даних, медіа та іншої інформації користувачів з груп, каналів, чатів. Також підготовлено групу, канал та чат в Telegram, зроблено пост в каналі з новинкою, залишено коментар під постом, й відправлено файл разом з повідомленням, що містить чутливі дані (рис. 2).

Тепер можна перейти до алгоритму збору і аналізу даних, що буде працювати у фоновому режимі після запуску системи. Завдяки бібліотеці WTelegramClient можна підписатися на оновлення з підготовленого акаунту і отримувати усі нові повідомлення, потрібні дані та зберігати їх до бази даних. Після чого вони одразу доступні в інтерфейсі користувача.

Також передбачено аналіз оновлень, що включає:

– валідацію, тобто перевірку типу оновлення, ідентифікатор списку прослуховування;

– наявність ідентифікатора відправника, чата в базі даних;

– тип вмісту повідомлення – медіа файли, документи та статус – особисте або групове повідомлення;

– наявність чутливої інформації у тексті повідомлення.

а)

б)

Рис. 2 – Демонстрація з чутливими даними: а) Повідомлення з акаунту Telegram,
б) Інтерфейс користувача розробленої інформаційної системи

На рисунку 2 для прикладу показано тестування розробленої інформаційної системи під час роботи з чутливими даними, а саме як тільки в групі з'явилось повідомлення, що містить файл-резюме та контактні дані відправника, система отримала це повідомлення, занесла його вміст і безпосередньо файл в базу даних, і тепер вміст повідомлення залишиться в базі даних системи, навіть, якщо повідомлення буде видалено з групи. На рисунку 2а видно, що повідомлення з чату, але відправник – група, і у секції Founds з'явились чутливі дані.

В цілому інформаційна система формування соціального профілю особистості здатна автоматично виявляти дані з онлайн-джерел, таких як чати, канали, групи та форуми месенджера Telegram завдяки OSINT-технології; класифікувати формати даних, такі як текст, зображення, відео та аудіо; фільтрувати дані за ключовими словами, темами, авторами або іншими критеріями.

Висновки. Розроблена інформаційна система формування соціального профілю особистості завдяки OSINT-технології є надійним інструментом для збору та аналізу даних з Telegram, забезпечуючи комплексний підхід і високий рівень безпеки та зручності використання. Здатна ефективно підтримувати дослідження та аналіз, надаючи користувачам можливість працювати з конфіденційною інформацією у безпечному середовищі. Забезпечення конфіденційності та безпеки даних стало пріоритетом у розробці. Для цього впроваджено кілька рівнів захисту, включаючи використання SSL для шифрування переданих даних, протокол MTProto для забезпечення безпеки комунікації у Telegram та захист бази даних MSSQL паролями та іншими механізмами контролю доступу. Ці заходи гарантують, що всі дані залишаються захищеними від несанкціонованого доступу та зловживань. Завдяки використанню Angular та spartan.ng, розроблено ефективний та зручний інтерфейс користувача, який дозволяє легкий доступ до даних та їх візуалізацію, полегшуючи користувачам роботу з великими обсягами інформації, що забезпечить високий рівень задоволення користувачів, які зможуть швидко знаходити та обробляти необхідну інформацію.

Список бібліографічного опису

1. М.В. Дерман, В.Ю. Остапчук, В.С. Дерев'янченко. Розробка мобільного додатку для визначення автентичності медіа файлу. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Київ: СНУ ім.В.Даля 2025. № 3(271). С.5-10.
2. Cascavilla, G., Beato, F., Burattin, A., Conti, M., & Mancini, L. V. (2016). OSSINT-Open Source Social Network Intelligence An efficient and effective way to uncover" private" information in OSN profiles. *arXiv preprint arXiv:1611.06737*.
3. Wallbaum, M., & Pöhn, D. (2024). Systematically Searching for Identity-Related Information in the Internet with OSINT Tools. *arXiv preprint arXiv:2407.16251*.
4. Panagiotou, A., Ghita, B., Shiaeles, S., & Bendiab, K. (2019). A machine-learning approach to Detect users' suspicious behaviour through the Facebook wall. *arXiv preprint arXiv:1910.14417*.

5 Mukhopadhyay, A., Venkatagiri, S., & Luther, K. (2024). OSINT Research Studios: A Flexible Crowdsourcing Framework to Scale Up Open Source Intelligence Investigations. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 8(CSCW1), 1-38.

6. I. Sušánka, J. Kokeš. Security Analysis of the Telegram IM. In Proceedings of the 1st Reversing and Offensive-oriented Trends Symposium (ROOTS). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017, pp. 1–8.

7.М.В. Деркач, О.С. Мишко. Використання алгоритму шифрування AES-256-CBC для зберігання даних автентифікації автономних асистентів. Наукові вісті Далівського університету. Електронне видання. №24, 2023.

References

1.Derkach M., Ostopolets V., Derevyanchenko V. Development of mobile application for determining authenticity of media file. Вісник VISNIK OF THE VOLODYMYR DAHL EAST UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY. Kyiv: EUNU, 2023. № 3 (279). P.5-10.

2.Casanovilla, G., Benito, F., Buraton, A., Conti, M., & Mancini, L. V. (2016). OSSINT-Open Source Social Network Intelligence: An efficient and effective way to "uncover" private" information in OSN profiles. *arXiv preprint arXiv:1611.06237*.

3.Walkow, M., & Pölm, D. (2024). Systematically Searching for Identity-Related Information in the Internet with OSINT Tools. *arXiv preprint arXiv:2407.16251*.

4.Panagiotou, A., Gupta, B., Shinedes, S., & Bendiab, K. (2019). A machine-learning approach to Detect users' suspicious behaviour through the Facebook wall. *arXiv preprint arXiv:1910.14417*.

5.Mukhopadhyay, A., Venkatagiri, S., & Luther, K. (2024). OSINT Research Studios: A Flexible Crowdsourcing Framework to Scale Up Open Source Intelligence Investigations. Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction, 8(CSCW1), 1-38.

6. I. Sušánka, J. Kokeš. Security Analysis of the Telegram IM. In Proceedings of the 1st Reversing and Offensive-oriented Trends Symposium (ROOTS). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2017, pp. 1–8.

7.Derkach M., Mishko O. Using AES-256-CBC encryption algorithm to store autonomous assistant authentication data. Scientific news of Dahl university. Electronic edition. №24, 2023.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-15
УДК 004.056
Жикін Юрій Сергійович, аспірант
http://orcid.org/0009-0001-5930-1444
Онай Микола Володимирович, к.т.н., доцент
http://orcid.org/0000-0002-4938-8355
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

МЕТОД КОНСОЛІДАЦІЇ ВИХОДІВ БІТКОЙН-ТРАНЗАКЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ СИМУЛЯЦІЇ ВИТРАЧАННЯ

Жикін Ю. С., Онай М. В. Метод консолідації виходів Біткойн-транзакцій за допомогою симуляції витрачання. У Біткойн-протоколі кожна транзакція споживає транзакційні виходи – записи, що зв'язують певну кількість одиниць біткойна з певним власником, за допомогою транзакційних входів – посилань на виходи, і створює нові виходи з новими кількостями і власниками, відображаючи таким чином акт зміни власності. Користувачі, що часто отримують платежі, накопичують велику кількість дрібних невикористаних виходів, що призводить до підвищення вартості майбутніх транзакцій, зниження швидкості роботи програмного забезпечення та загрози приватності фінансових даних. З метою зменшення кількості виходів користувачі використовують операції консолідації, які об'єднують багато дрібних виходів в один більший. Проте такі транзакції або їх каскади легко ідентифікуються в графі транзакцій, що дозволяє встановити зв'язки між виходами, що беруть участь в одній операції консолідації, погіршуючи фінансову приватність користувача. У цій статті пропонується метод багатокрокової консолідації виходів шляхом симуляції природного витрачання виходів. Для цього використовуються симуляційні транзакції з кількома входами та двома виходами, що виглядають як звичайні платежі з цільовим виходом та виходом-рештою. Запропонований метод ітеративно зменшує множину невикористаних виходів користувача до встановленого розміру без утворення очевидних патернів у графі транзакцій. Аналіз вартості показує, що навіть у випадку, коли користувач жертвує ефективністю заради мінімізації розміру груп пов'язаних виходів, загальна вартість багатокрокової консолідації зростає лише у 2-4 рази порівняно з простою консолідацією. У статті також формулюються напрями подальших досліджень, зокрема пошук патернів у графі транзакцій, що можуть бути викликані застосуванням складних схем багатокрокової консолідації виходів, а також пошук патернів зворотних операцій розбиття виходів на частини, що може бути ознакою злочинної діяльності, тощо.
Ключові слова: біткойн, граф транзакцій, аналіз графа, вартість транзакцій, консолідація, обфускація, приватність, безпека, криптовалюти, криптографія, еліптичні криві.

Zhykin Yu., Onai M. Method of Bitcoin transaction output consolidation using spending simulation. In the Bitcoin protocol, each transaction consumes transaction outputs – records that associate a specific amount of bitcoin with a particular owner – via transaction inputs, which are references to existing outputs, and creates new outputs with new amounts and owners, thus reflecting an act of ownership transfer. Users who frequently receive payments accumulate a large number of small unspent outputs, which increases costs of future transactions, decreases performance of wallet software, and threatens financial privacy. In order to reduce the number of outputs, users perform consolidation operations that merge many small outputs into a larger one. However, such transactions or their cascades are easily identifiable in the transaction graph, which allows linking the outputs involved in a single consolidation operation and thus deteriorates the user's financial privacy. This paper proposes a method of multi-step output consolidation through simulated natural spending. It uses simulating transactions with multiple inputs and two outputs which resemble typical payments with a target output and a change output. The proposed method iteratively reduces the set of user's unspent outputs to a certain target size without creating obvious patterns in the transaction graph. Cost analysis demonstrates that even when the user sacrifices efficiency in favor of minimizing the size of linked output groups, the total cost of multi-step consolidation increases only by a factor of 2-4 compared to simple consolidation. The article also outlines future research directions, including the identification of transaction graph patterns that may indicate the use of complex multi-step consolidation schemes, as well as patterns of reverse operations of splitting outputs into smaller parts, which may indicate illegal activities.
Keywords: Bitcoin, transaction graph, graph analysis, transaction fees, consolidation, obfuscation, privacy, security, cryptocurrencies, cryptography, elliptic curves.

Постановка проблеми. Транзакція у Біткойн-протоколі складається з структур, які називаються входами та виходами. Вихід засвідчує власність користувача над певною кількістю біткойна, і в свою чергу складається з двох компонентів: цілого числа, що представляє кількість базових одиниць біткойна, та програми блокування, що визначає умову використання цієї кількості біткойна. Транзакція створює певну кількість нових виходів і для їх створення повинна знищити певну кількість виходів, загальна сума біткойна у яких є не меншою за кількість біткойна у створених виходах. Вхід є посиланням на існуючий вихід, який знищується певною транзакцією, і містить програму розблокування, що задовольняє програму блокування відповідного виходу [1]. Весь біткойн у обігу в кожен момент часу представляється множиною невикористаних виходів, і Біткойн-транзакція є транзакцією не у фінансовому сенсі, а у сенсі бази даних, що представляє цю множину. Транзакція видаляє з цієї бази даних певну підмножину існуючих виходів і додає нові виходи

Кожен учасник Біткоїн-мережі підтримує власну копію цієї бази даних і основна функція всього Біткоїн-протоколу – забезпечити цілісність і ідентичність усіх копій цієї бази даних у всіх учасників мережі.

Користувач Біткоїн-системи, що отримує багато платежів, накопичує невикористані виходи, що призводить одночасно до декількох проблем. По-перше, комісія у Біткоїн-протоколі є динамічною, залежить від навантаження на мережу в даний момент, і сплачується за розмір транзакції, оскільки основним ресурсом, який споживає транзакція, є місце у ланцюгу блоків. Якщо у майбутньому користувачу доведеться здійснювати транзакцію на значно більшу суму, ніж типовий платіж, який він отримує, транзакція міститиме багато дрібних входів, і комісія за таку транзакцію може бути дуже високою. По-друге, оскільки програмне забезпечення, що працює з транзакціями (так званий Біткоїн-гаманець) зазвичай використовує алгоритми оптимізації розміру під час підбору входів для нової транзакції, чим більший простір пошуку оптимальної комбінації входів, тим повільніше працюватиме гаманець. Насамкінець, велика кількість невикористаних входів у гаманці ускладнює контроль за тим, щоб виходи з різних джерел не потрапляли в одну транзакцію, коли це може порушувати фінансову приватність користувача [2].

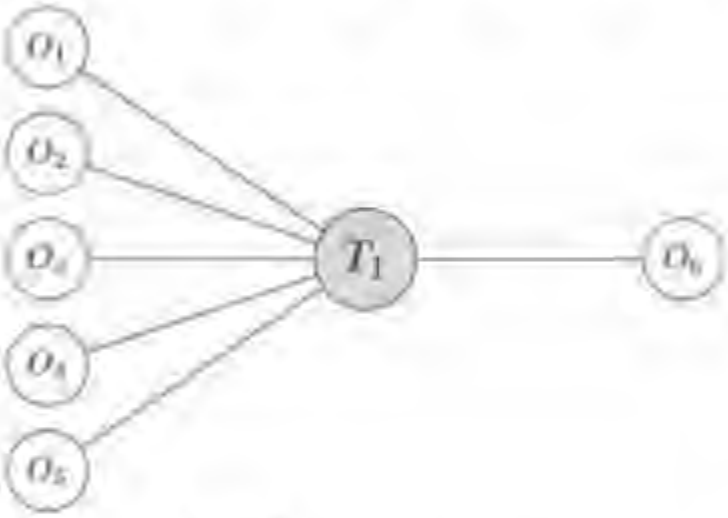


Рис. 1. Операція консолідації виходів

Як наслідок, однією з поширених типових операцій в Біткоїн-мережі є операція консолідації виходів: користувач час від часу надсилає самому собі транзакцію, яка знищує багато дрібних виходів та створює один великий. Такі операції в свою чергу породжують нову проблему: їх легко ідентифікувати під час аналізу графа транзакцій, знайшовши всі транзакції T такі, що кількість входів NIN(T) > 1, а кількість виходів NOUT(T) = 1, тобто транзакцій типу "багато входів, один вихід" (див. рис. 1). Оскільки зміст таких операцій є очевидним, всі виходи у кожній такій транзакції можуть бути позначені як такі, що належать одному й тому ж користувачу, що погіршує фінансову приватність у системі і спрощує подальший аналіз графа транзакцій. Наприклад, користувач, що консолідує кілька сотень виходів, накопичених протягом кількох років, розкриває всю історію отриманих платежів або значну її частину, а також загальну кількість біткоїна, яку він накопичив, і ця інформація може бути використана зловмисниками.

Аналіз існуючих досліджень та публікацій. У статті "Bitcoin Wiki: Privacy" [2] детально розглядаються проблеми приватності Біткоїн-транзакцій, зокрема поширені хибні уявлення, потенційні вразливості, пов'язані з повторним використання адрес, аналізом графа транзакцій і централізованими сервісами, які можуть накопичувати інформацію про своїх клієнтів. Також вміщено загальні рекомендації щодо транзакційної гігієни – набору практик і методів, які можуть підвищити приватність транзакційних даних, зокрема уникання повторного використання адрес та використання так званих протоколів другого рівня, таких як мережі платіжних каналів [3] та CoinJoin [4]. Хоча рекомендації, описані у цій статті, стосуються майже всіх Біткоїн-транзакцій, консолідація виходів у ній не розглядаються.

У роботі під назвою "Studying Bitcoin privacy attacks and their Impact on Bitcoin-based Identity Methods" [5] автори аналізують публікації, пов'язані з деанонімізацією користувачів Біткоїна і

підсумовують, що, що евристичне припущення щодо єдиного власника входів у транзакціях з багатьма входами є одним з найпоширеніших евристичних припущень у різних методах деанонімізації. Однією з перших публікацій, що формулюють це евристичне припущення, є "Quantitative Analysis of the Full Bitcoin Transaction Graph" від 2013 року [6]. Винятком для такого припущення є CoinJoin-транзакції, але їх легко відрізнити від інших транзакцій через особливість роботи протоколу CoinJoin [4]. Транзакція консолідації є особливим випадком транзакції з багатьма входами, для якої можна застосувати додаткове евристичне припущення про те, що і вихід з такої транзакції належить тому ж власнику.

Публікацій, що безпосередньо розглядають обфускацію консолідації транзакційних виходів, на даний момент не існує. При цьому приклади використання деяких примітивних методів обфускації можна знайти в історії транзакцій Біткоін-мережі. Ймовірним пояснення відсутності публікацій на цю тему є ненадійний але популярний принцип безпеки шляхом приховування деталей (Security through Obscurity) [7]: схема, за допомогою якої досягається обфускація певних операцій в мережі Біткоін, повинна залишатись в таємниці, щоб мати практичну цінність. Також не виключено, що метод, запропонований нижче, вже використовується у мережі, але не є описаним з тієї ж причини.

Постановка завдання. Оскільки, як було зазначено вище, на даний момент не існує публікацій, що розглядають обфускацію консолідації виходів, то передусім необхідно виділити і розглянути практичні схеми консолідації, що зустрічаються у реальному графі транзакцій. Наступною і основною задачею даного дослідження є розробка методу консолідації виходів, який не встановлює очевидних зв'язків між усіма виходами, які консолідуються, і при цьому є достатньо ефективним з точки зору сумарної комісії за транзакції. Насамкінець, необхідно оцінити вартість запропонованого методу з точки зору комісій за транзакції порівняно з простою консолідацією.

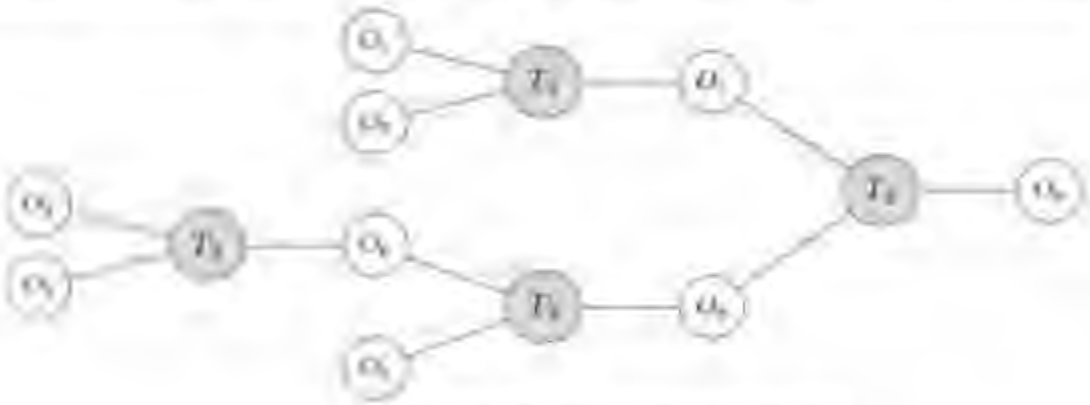


Рис. 2. Дерево багатокрокової консолідації

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним з примітивних методів обфускації консолідації виходів є багатокрокова консолідація, під час якої користувач здійснює об'єднання невеликої кількості виходів (2–4) у один. Якщо багатокрокова консолідація збігається у єдиний кінцевий вихід, то такі операції можна ідентифікувати, шукаючи замість єдиної транзакції типу "багато входів, один вихід" дерева таких транзакцій (див. рис. 2). Зміст такого патерну в графі транзакцій є настільки ж очевидним, як і зміст патерну, що відповідає простій операції консолідації. При цьому сумарна комісія за всі транзакції такої багатокрокової консолідації є значно більшою, тому такий метод практично є навіть гіршим за просту консолідацію.

Дещо кращим підходом є часткова консолідація, що не збігається у єдиний кінцевий вихід, а лише зменшує множину невикористаних виходів користувача до певного прийнятного розміру. Наприклад, користувач може зменшити кількість своїх виходів втричі, розбивши їх на групи по 3 виходи і здійснивши одну операцію консолідації для кожної такої групи. Недоліком такої часткової консолідації є те, що в загальному випадку має сенс здійснювати лише одну її ітерацію, оскільки об'єднання виходів попередньої ітерації утворює дерева (рис. 2). Фактично, часткова консолідація з багатьма ітераціями є еквівалентною багатокроковій консолідації.

Якщо користувач отримує і здійснює платежі, і відношення кількості надісланих платежів до кількості отриманих платежів за певний проміжок часу є меншою за певне значення N, то такий

користувач може регулювати кількість накопичених виходів, здійснюючи платежі транзакціями, що мають в середньому N входів, і таким чином консолідуючи виходи шляхом їх природного витрачання. Втім, такий підхід теж має декілька недоліків. По-перше, він не працює у випадках, коли користувач є продавцем товарів чи послуг, і отримує кошти значно частіше, ніж витрачає їх. По-друге, кожна така транзакція розкриває власність над всіма входами у ній контрагенту користувача, який до того ж знає, який саме вихід такої транзакції є цільовим, а який - рештою, і при цьому може сам бути задіяним у зборі інформації про виходи, що належать його контрагентам.

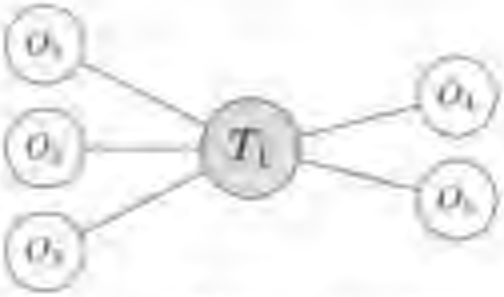


Рис. 3. Типова транзакція з цільовим виходом та виходом-рештою

Типова транзакція між двома користувачами зображена на рис. 3. Така транзакція зазвичай має декілька входів та 2 виходи: цільовий вихід та вихід-решту. Вихід-решта є необхідним, оскільки Біткоїн-транзакція не може знищити існуючий вихід частково і повинна поглинути його повністю, а різниця між кількістю біткоїна на вході і на виході транзакції автоматично стає комісією за неї [1]. В загальному випадку неможливо відрізнити, який з виходів є цільовим, а який – рештою, але під час аналізу графа транзакцій можуть використовуватись різні евристичні припущення [8], наприклад:

1. Гаманці намагаються мінімізувати розмір кожної створеної транзакції з метою мінімізації комісії, тому, якщо у одному з виходів кількість біткоїна є меншою за кількість у якомусь з входів, можна зробити припущення, що саме цей вихід і є рештою, інакше розмір транзакції не є оптимальним.

2. Оскільки кількість у цільовому виході часто формується людиною, вона з більшою ймовірністю буде невипадковим числом, наприклад 12'300'000 базових одиниць (0.123 біткоїна), тоді як кількість у виході-решті виглядатиме як випадкове число, наприклад 42491457 базових одиниць (0.42491457 біткоїна), якщо сумарна кількість на входів виглядає як випадкове число.

Метод обфускації консолідації виходів, що пропонується у даному дослідження, симулює природну консолідацію шляхом витрачання за допомогою транзакцій, які виглядають як типові транзакції з 2-ма виходами. Симулюючі транзакції повинні мати в середньому більше 2 входів для того, щоб кількість виходів зменшувалась з часом. Кількість входів у симулюючій транзакції визначає швидкість консолідації і обирається залежно від того, що є більш важливим для користувача: мінімізація комісії, чи мінімізації розміру груп виходів, зв'язаних між собою окремими транзакціями. Кількість входів також може обиратись випадково для кожної транзакції для підвищення асиметричності результуючого патерну у графі транзакцій.

Алгоритм консолідації ітеративно зводить кількість наявних виходів до цільової максимальної кількості N за допомогою симулюючих транзакцій з K входами (параметри N та K встановлюються користувачем):

1. Якщо кількість накопичених виходів перевищує значення N, вибираємо K довільних підтверджених невикористаних виходи з різних транзакцій, які будуть входами симулюючої транзакції.

2. Обчислюємо мінімальну кількість біткоїна у вході симулюючої транзакції A_{min} і створюємо 2 нових виходи такі, що кількість біткоїна є випадковим числом, більшим за A_{min}. Таким чином жоден вихід не є більше схожим на вихід-решту, ніж інший, відповідно до зазначених вище евристичних припущень. Список подібних припущень і, відповідно, даний крок алгоритму можуть бути розширені.

3. Конструюємо і публікуємо транзакцію з обраними входами та створеними виходами.

4. Повторюємо кроки 1-3, доки можливо задовольнити умови у кроці 1.

Патерн у графі транзакцій, що породжується цим алгоритмом, є значно складнішим за дерево консолідації (рис. 2) і тому значно гірше піддається автоматизованому розпізнаванню, але оскільки алгоритм можна продовжувати навіть до отримання єдиного виходу, має сенс накладати певні обмеження на використання виходів з попередніх ітерацій.

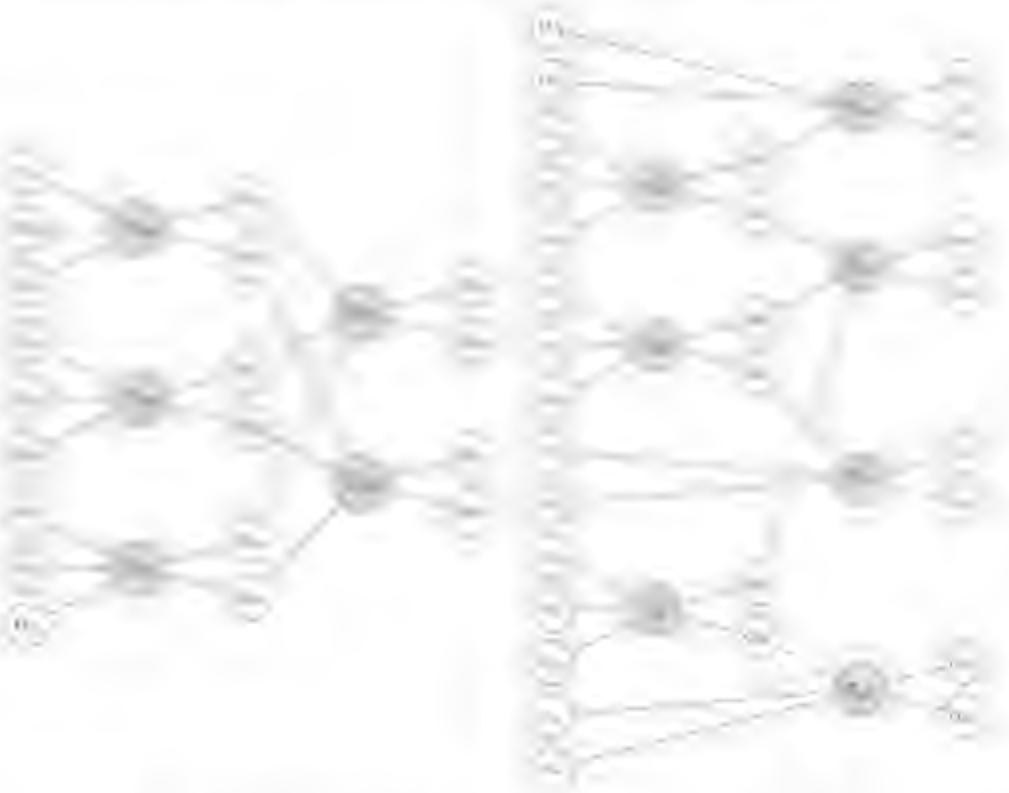


Рис. 4. Симетричний (зліва) та асиметричний (справа) графи консолідації

Розглянемо випадок, коли загальна кількість виходів невелика і всі виходи з попередньої ітерації стають входами для наступної, утворюючи осьово-симетричний граф. Приклад такого графа подано на рис. 4 зліва. На першій ітерації 9 виходів об'єднуються в групи по 3 виходи 3-ма транзакціями (T_{1A}, T_{1B} та T_{1C}). Використовуючи евристичне припущення про єдиного власника входів транзакції, графовий аналіз припускає, що ці 3 транзакції відображають 3-х власників, і їх виходи – 6-х власників (3-х нових отримувачів та 3-х попередніх). При цьому завдяки кроку 2 алгоритму, наведеного вище, неможливо відрізнити, який з виходів є цільовим, а який – рештою. Але на наступній ітерації транзакції T_{2A} та T_{2B} об'єднують групи по 3 виходи з попередньої ітерації, зменшуючи кількість потенційних власників з 6 до 2.

Для того, щоб унеможливити подібні припущення під час аналізу графа транзакцій, можна розширити крок 1 алгоритму, наведеного вище, правилом, що якщо 3 виходи попередньої ітерації стали входами однієї транзакції на даній ітерації, то інші виходи з тих же транзакцій попередньої ітерації повинні стати входами різних транзакцій наступної ітерації. Приклад такого графа зображений на рис. 4 справа. Тут друга ітерація консолідації (транзакції T_{2A}, T_{2B}, T_{2C} та T_{2D}) не зменшує кількості потенційних власників виходів попередньої ітерації (транзакцій T_{1A}, T_{1B} та T_{1C}). Окрім цього, утворений патерн графа не має осьової симетрії і є значно складнішим для розпізнавання навіть візуально.

Порівняємо вартість здійснення простої консолідації N виходів однією транзакцією та багатокрокової консолідації N виходів симулюючими транзакціями, кожна з яких має K виходів. Оскільки комісія сплачується за розмір транзакції у віртуальних байтах, то достатньо порівняти сумарний розмір всіх транзакцій для обох випадків. Середній розмір входу становить 108 байтів, а середній розмір виходу – 33 байти (оцінки зроблені за допомогою калькулятора розміру транзакції

[9]). Для зручності порівняння припустимо, що багатокрокова консолідація триває до отримання одного виходу. Вартість простої консолідації – це сумарна вартість N входів та одного результуючого виходу. Вартість багатокрокової консолідації – це сума вартостей всіх ітерацій, де вартість однієї ітерації – це сума вартостей всіх входів для виходів, що були створені попередньою ітерацією, та всіх виходів, що будуть створені даною ітерацією. Кількість ітерацій можна обчислити з параметрів N та K. Відношення вартостей багатокрокової консолідації та простої консолідації можна обчислити за допомогою наступної процедури, поданої мовою Python:

```
def CostIncrease(n, k):
    simple_cost = n * SIN + SOUT
    complex_cost = 0
    n_steps = math.floor(math.log(n, k / 2))
    n_left = n
    for i in range(n_steps):
        step_cost = n_left * SIN + 2 * (n_left / k) * SOUT
        complex_cost += step_cost
        n_left = 2 * (n_left / k)
    return complex_cost / simple_cost
```

Рис. 6. Збільшення вартості операції консолідації

Як видно з графіків на рис. 6, коефіцієнт збільшення вартості залежить лише від кількості виходів K у синтезуючих транзакціях і не залежить від кількості вихідних виходів N для достатньо великих N. При цьому для випадку K = 3, що мінімізує розмір груп виходів, між якими встановлюються зв'язки, а тому є найгіршим з точки зору ефективності, збільшення комісії за операцію консолідації становить приблизно 3.6 разів, що є допустимим, оскільки консолідація зазвичай здійснюється в періоди малого навантаження на мережу, коли спостерігається мінімальна допустима комісія (1 базова одиниця за байт). Наприклад, станом на 9 квітня 2025 року в умовах мінімальної комісії у мережі приблизна вартість простої консолідації 100 виходів становить 8.31 USD, тоді як вартість багатокрокової консолідації цих же входів синтезуючими транзакціями становить 30.50 USD.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонований метод багатокрокової консолідації транзакційних виходів за допомогою синтезації витрачання дозволяє знизити вартість дрібних виходів, що належать користувачу, об'єднуючи їх у більші виходи. Окремі транзакції у такій консолідації не зв'язують між собою великі групи виходів, на відміну від простої консолідації однією транзакцією, а також не утворюють дерев консолідацій у графі транзакцій, і тому не зв'язують між собою виходи, що не є зв'язаними в межах однієї транзакції, на відміну від примітивної багатокрокової консолідації. Збереження приватності досягається за рахунок

зменшення ефективності: багатокрокова консолідація за визначенням є дорожчою, ніж проста консолідація однією транзакцією, з точки зору кількості записів у блоках Біткоїна (а отже і сумарної комісії за виконання операції). При цьому збільшення вартості консолідації практично не залежить від кількості накопичених виходів і є прийнятним за умови відсутності навантаження на мережу під час здійснення консолідації (приблизно 3.6 рази у найгіршому випадку).

Важливим напрямком подальших досліджень є вивчення можливостей розпізнавання складних методів консолідації виходів на основі певних особливостей результуючого патерну у графі Біткоїн-транзакцій (симетричності, тощо). Пов'язаною з проблемою розпізнавання консолідації виходів є проблема розпізнавання зворотної операції – розбиття великого виходу, що є, наприклад, результатом крадіжки біткоїна, на менші виходи з метою їх легалізації.

Ще одним цікавим напрямком подальших досліджень є методи як здійснення, так і розпізнавання консолідацій виходів у графі транзакцій, що використовують розширення Біткоїн-протоколу під назвою Taproot [10]. Це розширення впроваджує альтернативний метод криптографічних підписів з підтримкою агрегації і тому дозволяє створювати кооперативні виходи з багатьма власниками, які при цьому не відрізняються від звичайних виходів з єдиним власником, а отже евристичні припущення щодо єдиного власника всіх входів таких транзакцій може бути неактуальним. Зокрема підграф транзакції консолідації та підграф транзакцій, що створює кооперативний вихід, виглядатиме однаково.

Список бібліографічного опису

1 Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. 9 p. URL: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf (date of access: 15.04.2025).
2 Privacy. 2025. URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Privacy (date of access: 15.04.2025).
3 Poon J., Dryja T. The Bitcoin Lightning Network: Scalable Off-Chain Instant Payments. 2016. 59 p. URL: https://lightning.network/lightning-network-paper.pdf (date of access: 15.04.2025).
4 Maxwell G. CoinJoin. Bitcoin privacy for the real world. URL: https://bitcointalk.org/?topic=279249 (date of access: 15.04.2025).
5 Ghesmati S., Fdhila W., Weippl E. Studying Bitcoin privacy attacks and their impact on Bitcoin-based Identity Methods. International Conference on Business Process Management. 2021. URL: https://eprint.iacr.org/2021/1088.pdf (date of access: 15.04.2025).
6 Ron D., Shamir A. Quantitative analysis of the full Bitcoin transaction graph. In Sadeghi, A.R., ed.: Financial Cryptography and Data Security. Volume 7859 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 6-24. URL: https://eprint.iacr.org/2012/584.pdf (date of access: 15.04.2025).
7 Security through obscurity. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Security_through_obscurity (date of access: 15.04.2025).
8 Nick J. D. Data-Driven De-Anonymization in Bitcoin : Master Thesis. Zurich, 2015. 34 p. URL: https://doi.org/10.3929/ethz-a-010541254 (date of access: 15.04.2025).
9 Transaction size calculator. Bitcoin Optech. URL: https://bitcoinops.org/en/tools/calc-size/ (date of access: 15.04.2025).
10 Wuille P., Nick J., Towns A. BIP 0341: Taproot: SegWit version 1 spending rules. 2020. URL: https://en.bitcoin.it/wiki/BIP_0341 (date of access: 15.04.2025).

References

1 Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. 9 p. URL: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf (date of access: 15.04.2025).
2 Privacy. 2025. URL: https://en.bitcoin.it/wiki/Privacy (date of access: 15.04.2025).
3 Poon J., Dryja T. The Bitcoin Lightning Network: Scalable Off-Chain Instant Payments. 2016. 59 p. URL: https://lightning.network/lightning-network-paper.pdf (date of access: 15.04.2025).
4 Maxwell G. CoinJoin. Bitcoin privacy for the real world. URL: https://bitcointalk.org/?topic=279249 (date of access: 15.04.2025).
5 Ghesmati S., Fdhila W., Weippl E. Studying Bitcoin privacy attacks and their impact on Bitcoin-based Identity Methods. International Conference on Business Process Management. 2021. URL: https://eprint.iacr.org/2021/1088.pdf (date of access: 15.04.2025).
6 Ron D., Shamir A. Quantitative analysis of the full bitcoin transaction graph. In Sadeghi, A.R., ed.: Financial Cryptography and Data Security. Volume 7859 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2013. P. 6-24. URL: https://eprint.iacr.org/2012/584.pdf (date of access: 15.04.2025).
7 Security through obscurity. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Security_through_obscurity (date of access: 15.04.2025).
8 Nick J. D. Data-Driven De-Anonymization in Bitcoin : Master Thesis. Zürich, 2015. 34 p. URL: https://doi.org/10.3929/ethz-a-010541254 (date of access: 15.04.2025).
9 Transaction size calculator. Bitcoin Optech. URL: https://bitcoinops.org/en/tools/calc-size/ (date of access: 15.04.2025).
10. Wuille P., Nick J., Towns A. BIP 0341: Taproot: SegWit version 1 spending rules. 2020. URL: https://en.bitcoin.it/wiki/BIP_0341 (date of access: 15.04.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-16
УДК 004.056.5
Здолбіцька Ніна Василівна[1], к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-1345-5381
Здолбіцький Андрій Петрович[2], інженер-програміст
https://orcid.org/0009-0008-5429-5829
Гейко Богдан Вікторович[1], студент
[1]Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна
[2]ТОВ «Пластхім Україна», м. Луцьк, Україна

WPF КЛІЄНТ-СЕРВЕРНИЙ ДОДАТОК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПЕРАТИВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ З БАЗАМИ ДАНИХ

Здолбіцька Н. В., Здолбіцький А. П., Гейко Б. В. WPF клієнт-серверний додаток для забезпечення оперативної взаємодії з базами даних. У статті описано реалізацію інтерактивного WPF клієнт-серверного додатка для забезпечення планування виробничих процесів (завдань на виробничих одиницях на лінії) промисловості. Розв'язано завдання оперативної взаємодії з базами даних. Серверна частина відповідає за зберігання, обробку та надання даних, тоді як клієнтська частина відповідає за відображення та взаємодію з користувачем. Клієнт-серверний додаток призначений для зберігання та представлення детальної інформації про записи плану виробничого замовлення у системі планування виробництва, агрегує велику кількість даних, що стосуються кожного конкретного завдання. Дані представлено у вигляді форматованих таблиць із заголовками категорій плану та статусів виконання. Реалізовано інтерактивність вибору окремих елементів рядків та оновлення візуальних даних у режимі реального часу. Подано діаграму класів UML структури клієнт-серверного додатка, а саме набір класів та їх атрибутів, полів, властивостей, методів та подій. Об'єкти класу можуть сповіщати інші компоненти програми, зокрема елементи інтерфейсу користувача про зміну значень своїх властивостей, що є ключовим для механізму прив'язки даних у WPF. Забезпечення швидкого доступу до актуальних даних дозволяє приймати обґрунтовані рішення та ефективно виконувати робочі завдання.
Ключові слова: клієнт-серверний додаток, аналіз даних, планування виробництва, Microsoft Visual Studio, C#, WPF, XAML, .Net Framework, Microsoft SQL Server.

Zdolbitska N., Zdolbitskyi A., Heiko B. WPF client-server application for ensuring operational interaction with databases. The article describes the implementation of an interactive WPF client-server application for ensuring the planning of production processes (batches at production units on the line) in industry. The task of operational interaction with databases is solved. The server part is responsible for storing, processing, and providing data, while the client part is responsible for displaying and interacting with the user. The client-server application is designed to store and present detailed information about production order plan records in the production planning system, aggregating a large amount of data related to each specific task. The data is presented in the form of a formatted table with headings of plan categories and execution statuses. The interactivity of selecting individual row elements and updating visual data in real time is implemented. A UML class diagram of the client-server application structure is presented, namely a set of classes and their attributes, fields, properties, methods, and events. Class objects can notify other application components, including user interface elements, about changes to their property values, which is key to WPF's data binding mechanisms. Providing quick access to up-to-date data allows you to make informed decisions and perform work tasks efficiently.
Keywords: client-server application, data analysis, production planning, Microsoft Visual Studio, C#, WPF, XAML, .Net Framework, Microsoft SQL Server.

Постановка проблеми.

Сучасні інформаційні системи усе частіше вимагають оперативного доступу до актуальних даних та їх відображення у режимі реального часу для забезпечення ефективної роботи користувачів. Особливо це є критичним у сферах, у яких швидкість прийняття рішень залежить від миттєвої обізнаності про реальні дані, наприклад, системи управління виробництвом чи системи моніторингу, торгові платформи, тощо.

Існуючі підходи до розробки клієнт-серверних додатків часто передбачають періодичне оновлення даних на клієнтській стороні через запити до сервера. Це у свою чергу може призводити до затримок при відображенні актуальної інформації, неефективного використання мережевих ресурсів та погіршення користувацького досвіду, особливо при великій кількості клієнтів та інтенсивних змінах даних.

Технологія Windows Presentation Foundation (WPF) надає потужні інструменти для розробки графічних інтерфейсів користувача з можливістю прив'язки та візуалізації даних. Однак, ефективна реалізація оновлення даних у режимі реального часу клієнт-серверної архітектури на базі WPF потребує спеціальних підходів та технологій для забезпечення миттєвої синхронізації між сервером та клієнтами, мінімізуючи затримки, оптимізуючи використання обчислювальних ресурсів та забезпечуючи високу якість роботи користувачів.

Вирішення цієї проблеми вимагає дослідження та застосування відповідних технологій та архітектурних рішень, що дозволяють клієнтам бачити реальні зміни в базі даних, а клієнтському додатком – ефективно візуалізувати ці зміни без повного перезавантаження інтерфейсу.

Розробка WPF клієнт-серверного додатка для роботи з базою даних у режимі реального часу покриває широкий спектр застосувань для ведення бізнесу та планування виробничих процесів, адже забезпечується:

– зростання вимог до сучасних інтерактивних інформаційних систем, їх функціональності, інтерактивності та високої продуктивності;

– клієнт-серверна архітектура додатка забезпечує гнучкість та можливість розподіленої обробки даних;

– WPF дозволяє створювати ефективний та адаптивний інтерфейс десктопних додатків для обробки та відображення великих обсягів;

– безпека та контроль доступу до певної інформації чи даних;

– моніторинг оновлених даних у режимі реального часу, наприклад завантаженість виробничих машин на лінії, стан обладнання, тощо;

– підвищення ефективності роботи системи в цілому, масштабованість та розширюваність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Виробничі компанії стикаються з проблемами планування виробництва через непостійний попит на певні товари та індивідуальні замовлення. Дослідження [1, 2] підкреслює важливість перепланування для стійкості виробництва на замовлення в умовах ринкової нестабільності. Щоб зменшити витрати, підвищити якість і прискорити виробництво, необхідно оптимізувати процеси, зокрема точно прогнозувати потреби [3] та ефективно здійснювати планування послідовності виконання робіт. Для зростання потреб і підвищення ефективності різних підприємств необхідно враховувати попит, запаси сировини, логістику постачання, планування браку виробництва та відходів, тощо [4]. Автори [5] запропонували гнучкий алгоритм оптимізації фіксованого монтажного цеху при плануванні виробництва. Революція Industry 4.0 кардинально трансформує виробництво завдяки цифровим технологіям, інтегруючи програмне забезпечення та підключене обладнання [6], реалізуючи концепцію цифрового двійника для інтеграції системи планування виробництва з передовими технологіями [7]. Щоб забезпечити високу якість виробництва, на підприємствах створюється комплексна гібридна система планування з інтегрованим формуванням графіків [8], або ж розподілене та децентралізоване керування машинами за допомогою машинного інтелекту [9]. Алгоритми [10, 11] враховує існуючу мережу виробничих потужностей, яка може гнучко адаптуватися до пріоритетів замовлень та здатності виробничих одиниць, що робить його придатним для використання на підприємствах.

Викладення основного матеріалу і обґрунтування отриманих результатів.

Для розробки клієнт-серверного додатку для забезпечення оперативної взаємодії з базами даних визначимо необхідні інструменти на базі технології WPF. При створенні клієнт-серверного додатку використано технології, що зображено на рисунку 1.

Рис. 1 – Засоби реалізації клієнт-серверного додатку

Основною IDE буде Microsoft Visual Studio 2022, середовище на платформі від .NET для написання та налагодження коду, проектування інтерфейсу WPF, інтеграції з системами контролю версій та інше.

Програмування клієнтської частини додатку на .NET та WPF будемо втілювати за допомогою:

– об'єктно-орієнтованої мови C#, що має величезну кількість підключених бібліотек;

– .NET Framework, що забезпечує необхідні класи та бібліотеки;

– декларативна мова розмітки XAML для оформлення інтерфейсу користувача WPF, що дозволяє відокремити дизайн від логіки додатку;

– Entity Framework Core для спрощення взаємодії з базою даних через об'єкти C#, щоб не створювати SQL-запити;

– архітектурний патерн Model-View-ViewModel (MVVM), що здійснює перерозподіл між компонентами, полегшуючи тестування та підтримку коду;

– Data Binding XAML для автоматичної синхронізації відображення оновлених даних інтерфейсу користувача (Material Design in XAML Toolkit) та об'єктами C#,

– елементи інтерфейсу користувача UI та налаштування дизайну: кнопки, таблиці, поля, тощо

Для реалізації серверної частини додатку використаємо платформу .NET Framework. Для створення API, через який клієнтська частина взаємодіятиме з сервером за протоколом HTTP, застосовуватиметься технологія ASP.NET Core Web API. Для керування даними використаємо Microsoft SQL Server 2019 та Microsoft SQL Server Management Studio 20.2.

Для забезпечення обміну даними між сервером та клієнтами у режимі реального часу використовуються Toolkit Data Visualization WPF. Вибір конкретних інструментів та технологій залежить від розміру та складності проекту, вимог до продуктивності, безпеки та інших факторів. Перелічені вище засоби є основними для розробки клієнт-серверного WPF-додатку з функціоналом в режимі реального часу.

Windows Presentation Foundation надає розробникам потужні та гнучкі засоби для побудови функціональних десктопних програм для Windows з інтуїтивно зрозумілим візуальним інтерфейсом. Основні переваги Windows Presentation Foundation подано на рисунку 2.

Рис. 2 – Основні можливості WPF

Проект «FlexPlanManuf» має наступну файлову та компонентну структуру (рис. 3)

Каталог «Properties» містить метадані збірки, а також ресурси необхідні для локалізації (текстові рядки різними мовами), зображення логотипу програми та конфігураційний файл, що визначає налаштування програми та параметри підключення.

У вкладці «References» знаходиться перелік посилань на стандартні бібліотеки .NET Framework та зовнішні бібліотеки NuGet-пакети. Файл конфігурації програми «App.config» визначає загальні налаштування, параметри підключення до бази даних та налаштування логування.

Файл розмітки XAML «App.xaml» є основним класом інтерфейсу програми App. Тут також можуть бути визначені глобальні ресурси, такі як стилі та теми, що застосовуються до всього додатку. З ним пов'язаний файл коду «App.xaml.cs», що містить логіку класу програми, включаючи обробники подій життєвого циклу додатку. «BindingSQL.cs» – це файл з кодом для базового класу BindingSQL. Цей клас відповідає за встановлення з'єднання з базою даних SQL Server, виконання запитів до бази даних та забезпечення обміну даними у режимі реального часу. Файл «ClassDiagram1.cd» містить UML-діаграму класів проекту, візуально представляючи структуру класів та зв'язки між ними. Файл розмітки XAML «MainWindow.xaml» описує структуру та вигляд головного вікна додатка MainWindow, всі елементи інтерфейсу користувача.

Графічний файл tf_s01.png у форматі .png, містить зображення логотипу програми.

За представлення моделі даних бізнес-логіки відповідає клас «TicketInfo.cs».

Зовнішній вигляд інтерфейсу вікна авторизації користувача WindowLogon та елементи керування (поля для вводу логіна та пароля) описує файл розмітки XAML WindowLogon.xaml. З ним асоційований файл коду «WindowLogon.xaml.cs», що містить логіку роботи вікна авторизації, таку як обробка введених користувачем даних, тобто логіну та пароля, та реакція на натискання кнопок. За функціональність друку поточних результатів роботи програми у форматі PDF відповідає клас «WpfPrinting.cs».

Рис. 3 – Загальна структура проекту FlexPlanManuf

На рисунку 4 подано діаграму класів UML структури клієнт-серверного додатка, а саме набір класів та їх атрибути, поля, властивості, методи та події.

Рис. 4 – Узагальнена діаграма класів FlexPlanManuf

Головне вікно додатку «FlexPlanManuf» має наступні візуальні компоненти, що подано на рисунку 5.

Рядок заголовка Title Bar розташований у верхній частині вікна, відображає назву клієнт-серверного додатку «FlexPlanManuf» та стандартні системні кнопки для керування вікном.

(розгорнути, згорнути, відновити, закрити). Безпосередньо під рядком заголовка знаходиться рядок меню «Menu Bar», на якому містить текстові пункти меню, такі як «Файл» та «Опції». При виборі пункту меню розкривається список доступних команд (наприклад, у меню «Файл» – зміна користувача, у меню «Опції» – друк документа).

Рис. 5 – Головне вікно додатку «FlexPlanManuf»

Центральна та найбільша частина вікна є основною робочою областю, що призначена для відображення основних даних. Дані подані у вигляді таблиці з чітко визначеними заголовками стовпців відповідно категоріям плану та статусам виконання. Реалізовано інтерактивність: користувач може вибирати окремі рядки, а дані оновлюються у режимі реального часу. Заголовки стовпців («Замовник», «Мотив», «Статус», «Сировина», «Кількість», «Загальна Вага», «Довжина», «Тип плівки / ширина», «Обл. вала», «Тип друку», «Дата виготовлення», «Відвантаження», «Назва», «Статус вироб.», «Пріоритет клише», «Наявність клише», «Пріоритет сировина», «Пріоритет план») розташовані у верхньому рядку таблиці. Подвійне клацання мишею по заголовку стовпця дозволяє сортувати дані за відповідною категорією. Кожен рядок таблиці визначає окремо планове замовлення на виробництво.

Смуги прокручування «Scroll Bars», за допомогою вертикальної смуги розташованої праворуч таблиці можна переглядати рядки таблиці, які не вміщуються у видиму область по висоті, за допомогою горизонтальної смуги розташованої під таблицею можна переглядати стовпці таблиці, які не вміщуються у видиму область по ширині, особливо при використанні екранів з різним розширенням.

На панелі розташованій у нижній частині вікна знаходиться рядок стану «Status Bar», тут відображається допоміжна службова інформація, таку як поточний режим роботи, назва активного обладнання (наприклад, «COMEXY»), вибрані опції, версія програми (наприклад, «Версія 2.11») та статус з'єднання (онлайн/офлайн).

Висновки та перспективи подальших досліджень

Створення інтерактивного WPF клієнт-серверного додатку для оперативної взаємодії з базами даних є практичним завданням, яке забезпечує ефективну роботу з даними та може покращити бізнес-процеси підприємства. Клієнт-серверна архітектура додатку забезпечує розподіл відповідальності та покращує масштабованість та керованість. Серверна частина відповідає за зберігання, обробку та надання даних, тоді як клієнтська частина відповідає за відображення та взаємодію з користувачем. Забезпечення швидкого доступу до актуальних даних дозволяє приймати обґрунтовані рішення та ефективніше виконувати робочі завдання.

При розробці такого додатку важливо враховувати аспекти безпеки, продуктивності та надійності. Захист даних, оптимізація запитів до бази даних та обробка помилок є критично важливими для забезпечення стабільної та безпечної роботи додатку.

Список бібліографічного опису

1 Guzman E., Andres B., Poler R. Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review. Journal of Industrial Information Integration. Vol. 27. 2022. pp. 100287.
2 Ninat Theradapuzha Mathew, Bjørn Johanssen. Production Planning and Scheduling Challenges in the Engineer-to-Order Manufacturing Segment: A Literature Study. International Journal of Innovation, Management and Technology. Vol. 14, No. 3, 2023, pp. 80-87. doi: 10.18178/ijimt.2023.14.3.942
3 Nina Zdolbitska, Oleksandr Ostapchuk, Svitlana Lavrenchuk, Taras Terletskyi, Oleh Kaidyk, Oksana Zhybarevych. Business Information System for Forecasting Raw Material Stocks for the Production of Flexible Packaging. 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2024
4 Simulation Modeling and Analysis for Performance Measurement in the Production Line. URL: https://www.researchgate.net/publication/326622320_Simulation_Modeling_and_Analysis_for_Performance_Measurement_in_the_Production_Line (дата звернення: 10.05.2025)
5 Jiang N. Y., Yan H. S. Integrated optimization of production planning and scheduling in uncertain re-entrance environment for fixed-position assembly workshops. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. Vol. 42(3), 2022. pp. 1705-1722. doi:10.3233/JIFS-211159
6 Herrmann J.P., Tackenberg S., Padoano L., Gamber T. Approaches of production planning and control under industry 4.0: A literature review. Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM). Vol. 15(1), 2022. pp. 4-30. doi:10.3926/jiem.3582
7 Luo D., Thevenin S., Dolgui A. A state-of-the-art on production planning in Industry 4.0. International Journal of Production Research. Vol. 61(19), 2023, pp. 6602-6632. doi.org/10.1080/00207543.2022.2122622
8 Chen C., Lee Kong L., Kan W. Identifying the promising production planning and scheduling method for manufacturing in Industry 4.0: a literature review. Production & Manufacturing Research. Vol. 11(1), 2023. pp. 1-21. doi: 10.1080/21693277.2023.2279329
9 Jeff Morgan, Mark Halton, Yuansong Qiao, John G. Breslin. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. Journal of Manufacturing Systems. Volume 59, 2021. pp. 481-506. doi: 10.1016/j.jmsy.2021.03.001
10. Zdolbitska N., Heiko B., Mitsuni Yu. Client-server application for planning and production scheduling based on WPF. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційна безпека та комп'ютерні технології» (Луцьк, Україна, 24-25 квітня 2025 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. с. 32
11. Lu Z. M., Jiang T. R., Lu Z. W. Multiproduct and multistage integrated production planning model and algorithm based on an available production capacity network. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. Vol. 28, 2021. pp. 1343-1352.

References

1 Guzman E., Andres B., Poler R. Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review. Journal of Industrial Information Integration. Vol. 27, 2022. pp. 100287.
2 Ninat Theradapuzha Mathew, Bjørn Johanssen. Production Planning and Scheduling Challenges in the Engineer-to-Order Manufacturing Segment: A Literature Study. International Journal of Innovation, Management and Technology. Vol. 14, No. 3, 2023, pp. 80-87. doi: 10.18178/ijimt.2023.14.3.942
3 Nina Zdolbitska, Oleksandr Ostapchuk, Svitlana Lavrenchuk, Taras Terletskyi, Oleh Kaidyk, Oksana Zhybarevych. Business Information System for Forecasting Raw Material Stocks for the Production of Flexible Packaging. 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2024.
4 Simulation Modeling and Analysis for Performance Measurement in the Production Line. URL: https://www.researchgate.net/publication/326622320_Simulation_Modeling_and_Analysis_for_Performance_Measurement_in_the_Production_Line
5 Jiang N. Y., Yan H. S. Integrated optimization of production planning and scheduling in uncertain re-entrance environment for fixed-position assembly workshops. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. Vol. 42(3), 2022. pp. 1705-1722. doi:10.3233/JIFS-211159
6 Herrmann J.P., Tackenberg S., Padoano L., Gamber T. Approaches of production planning and control under industry 4.0: A literature review. Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM). Vol. 15(1), 2022. pp. 4-30. doi:10.3926/jiem.3582
7 Luo D., Thevenin S., Dolgui A. A state-of-the-art on production planning in Industry 4.0. International Journal of Production Research. Vol. 61(19), 2023, pp. 6602-6632. doi.org/10.1080/00207543.2022.2122622
8 Chen C., Lee Kong L., Kan W. Identifying the promising production planning and scheduling method for manufacturing in Industry 4.0: a literature review. Production & Manufacturing Research. Vol. 11(1), 2023. pp. 1-21. doi: 10.1080/21693277.2023.2279329
9 Jeff Morgan, Mark Halton, Yuansong Qiao, John G. Breslin. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. Journal of Manufacturing Systems. Volume 59, 2021. pp. 481-506. doi:10.1016/j.jmsy.2021.03.001
10. Zdolbitska N., Heiko B., Mitsuni Yu. Client-server application for planning and production scheduling based on WPF. Materials of the 8th International Scientific and Practical Conference «Information Security and Computer Technologies» abstracts of reports. April 24-25, 2025. Kropyvnytskyi: Central Technical University, 2025. p. 32
11. Lu Z. M., Jiang T. R., Lu Z. W. Multiproduct and multistage integrated production planning model and algorithm based on an available production capacity network. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. Vol. 28, 2021. pp. 1343-1352.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-17
УДК 004.93
Казимира Ірина Ярославівна, канд. техн. наук, доцент
https://orcid.org/0000-0003-1597-9647
Цапів Володимир Володимирович, магістр
https://orcid.org/0009-0008-2470-7483
Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЖЕСТІВ РУК У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ НА ПЕРИФЕРІЙНИХ ПРИСТРОЯХ

Казимира І. Я., Цапів В. В. Система розпізнавання динамічних жестів рук у реальному часі на периферійних пристроях. У даній роботі представлено систему розпізнавання динамічних жестів рук у реальному часі, оптимізовану для ефективної взаємодії з інтелектуальними пристроями та безконтактними інтерфейсами, зокрема на периферійних пристроях. Розроблена система поєднує Google Mediapipe для визначення точок руки, що дозволяє легким для запуску на мобільних пристроях, і модифіковану архітектуру DD-Net, оптимізовану для онлайн класифікації жестів з використанням 2D та 3D даних. Ключові нововведення включають впровадження динамічної класифікаційної голови для вирішення проблеми дисбалансу класів та механізму уваги для покращення розпізнавання частково спостережуваних жестів. Розробка системи була протестована на наборах даних NVGesture та SHREC22, досягнуто точності 0.784 та 0.924, відповідно, що перевищує попередні результати. Експериментальні результати демонструють високу ефективність запропонованого підходу у задачах розпізнавання жестів в реальному часі, зокрема на мобільних платформах. Показано, що використання 3D даних та механізму уваги дозволяє значно покращити точність розпізнавання, особливо для складних та частково видимих жестів. Запропонована система може бути використана в широкому спектрі застосувань, включаючи системи віртуальної та доповненої реальності, робототехніку та безконтактні інтерфейси на периферійних пристроях.
Ключові слова: розпізнавання жестів в реальному часі, взаємодія людини з комп'ютером, динамічні жести рук, глибоке навчання, комп'ютерний зір, периферійні пристрої.

Kazymyra I., Tsapiv V. Real-time dynamic hand gesture recognition system on edge devices. This paper presents a novel real-time dynamic hand gesture recognition system designed for efficient interaction with smart devices and touchless interfaces, with a focus on edge devices. The proposed system integrates Google Mediapipe for hand pose detection, which is lightweight enough to run on mobile devices, with a modified version of the DD-Net architecture, optimized for real-time classification of gestures using 2D and 3D data. Key innovations include the introduction of an auxiliary classification head to address class imbalance and an attention mechanism to improve the recognition of partially observed gestures. The system is evaluated on the NVGesture and SHREC'22 datasets, achieving an accuracy of 0.784 and 0.924, respectively, surpassing previous benchmarks. Experimental results demonstrate the high efficiency of the proposed approach in real-time gesture recognition tasks, particularly on mobile platforms. It is shown that the use of 3D data and an attention mechanism significantly improves recognition accuracy, especially for complex and partially visible gestures. The proposed system can be used in a wide range of applications, including virtual and augmented reality systems, robotics, and touchless interfaces on edge devices.
Keywords: real-time gesture recognition, human-computer interaction, dynamic hand gestures, deep learning, computer vision, edge devices.

Постановка проблеми. Взаємодія людини з комп'ютером (Human-Computer Interaction, HCI) активно розвивається, переходячи від традиційних методів введення даних до більш природних форм комунікації. Одним із перспективних напрямків є розпізнавання жестів рук, яке забезпечує інтуїтивне управління пристроями, зокрема у сферах доповненої та віртуальної реальності (AR/VR), робототехніки та безконтактних інтерфейсів. Важливість цієї технології суттєво зросла через необхідність мінімізувати фізичний контакт у громадських місцях, що стало особливо актуальним після пандемії COVID-19 [1].

У світовій науковій літературі дослідження у сфері розпізнавання жестів охоплюють різні методи комп'ютерного зору та глибокого навчання. Значний прогрес досягнуто у використанні згорткових нейронних мереж (CNN), рекурентних мереж (RNN), трансформерів та гібридних моделей. Однак більшість існуючих рішень орієнтовані на аналіз попередньо підготовлених послідовностей і не завжди відповідають вимогам реального часу через високі обчислювальні витрати. Це створює розрив між теоретичними досягненнями та практичними застосуваннями, особливо у випадках, коли необхідна низька затримка та ефективна робота на пристроях з обмеженими ресурсами.

Незважаючи на значні досягнення в галузі, залишається відкритим питання ефективного розпізнавання динамічних жестів у реальному часі з урахуванням обчислювальних обмежень. Відповідно, дослідження моделей і методів розпізнавання жестів у потоковому відео для

забезпечення інтерактивного управління смарт-пристроями та безконтактними інтерфейсами є актуальним завданням.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси розпізнавання жестів у реальному часі на потоковому відео. Предметом дослідження є нейронні мережі, алгоритми та інструменти, що використовуються для цієї задачі.

Мета і завдання дослідження. Основна мета роботи – розробка та оптимізація системи розпізнавання жестів у реальному часі. Для її досягнення були визначені такі завдання:

– провести аналіз існуючих методів розпізнавання жестів та їх ефективності для застосування в реальному часі;

– оцінити продуктивність сучасних моделей з урахуванням апаратних обмежень,

– розробити та оптимізувати архітектуру нейронної мережі для стабільного розпізнавання жестів.

провести експериментальні дослідження та оцінити точність розробленої системи на різних наборах даних.

Розроблена система розпізнавання жестів сприятиме покращенню інтерактивного управління смарт-пристроями, забезпечуючи швидкість та точність роботи в реальному часі.

Аналіз існуючих моделей та підходів.

Однією з передових моделей є STA-GCN (Spatial-Temporal Attention Graph Convolutional Network), запропонована Wang та ін. [4]. Ця модель використовує двопотокову архітектуру графової згорткової мережі, де окремо обробляються дані про пози та рухи рук. Ключовою особливістю є застосування просторово-часової уваги, що дозволяє моделі виявляти найбільш важливі суглоби та часові інтервали для точного розпізнавання жестів. STA-GCN [4, 11] показала високу ефективність на наборах даних DHG14/28 та SHREC'2017 [18]. Механізми уваги відіграють важливу роль у підвищенні точності, дозволяючи моделі концентруватися на найбільш інформативних частинах вхідних даних.

У роботі [5] представлено багаторівневу модель LSTM, яка комбінує дані глибини та скелетні дані для підвищення надійності розпізнавання жестів. Хоча ця модель досягла високих результатів на еталонних наборах даних, вона вимагає значних обчислювальних ресурсів через використання даних глибини та складної архітектури LSTM, що може бути обмеженням для застосувань на пристроях з обмеженою потужністю.

DD-Net (Double-feature Double-motion Network), розроблена Liu та ін. [6], є прикладом легковажної мережі, спрямованої на швидке та ефективне розпізнавання дій на основі скелетних даних. DD-Net використовує різниці координат суглобів (JCD) та багатомасштабну глобальну характеристику руху для врахування змін швидкості виконання жестів. Результати показали, що хоча JCD є інваріантними до положення камери, для представлення глобального руху потрібні двошкальні характеристики. Важливо відзначити, що, на відміну від STA-GCN [4], оригінальна версія DD-Net не використовує механізми уваги.

У контексті SHREC 2022 [7] розглядалися гетерогенні системи розпізнавання жестів, зокрема моделі, що використовують двоступеневу ST-GCN [7] та Casual TCN [7]. Ці моделі застосовують техніку ковзного вікна для ізоляції жестів у безперервному потоці даних та використовують часові згорткові мережі (TCN) для уникнення витоку інформації з майбутнього, що є важливим для онлайн-детекції. Також була представлена мережа Transformer з машиною станів у кінці (TN-FSM) [7], яка використовує 3D-позиції суглобів рук для збагачення характеристик та чіткого визначення меж жестів у часі.

Модель Stronger [8] інтегрує DD-Net з техніками ковзного вікна для безперервного виявлення жестів, використовуючи шість різних вхідних характеристик, включаючи JCD, різниці між парами суглобів та орієнтацію долоні. Хоча Stronger [8] досягає високої точності класифікації, вона страждає від великої кількості помилкових розпізнавань у моменти, коли жест насправді не виконується.

DeepGRU [9] демонструє інший підхід, використовуючи GRU (Gated Recurrent Units) та глобальний механізм уваги для навчання розпізнаванню жестів від початку до кінця на основі сирих даних скелетів та поз. Архітектура на основі GRU з увагою пропонує простішу, але ефективну альтернативу GCN та LSTM, досягаючи порівнянних результатів без необхідності складної попередньої обробки даних.

У рамках SHREC 2019 [10] були представлені нові архітектури для онлайн-сегментації жестів, такі як Divide et Agnosce та Sliding Window 3-Cent. Divide et Agnosce використовує двоступеневу мережу, де один етап сегментує жести в реальному часі, а інший класифікує кожен сегмент. Метод Sliding Window 3-Cent є адаптацією алгоритму k-найближчих сусідів (kNN) для роботи в онлайн-контексті.

Сучасні дослідження в галузі розпізнавання жестів спрямовані на розробку моделей, які є одночасно точними та ефективними, особливо для застосувань у реальному часі [8, 12, 15, 16]. Актуальність цієї галузі постійно зростає завдяки зростанню попиту на інтуїтивні та безконтактні способи взаємодії з технологіями в різних сферах, від керування смарт-пристроями до віртуальної реальності та медичних застосувань.

Невирішені проблеми та обмеження. Незважаючи на значний прогрес, існують невирішені проблеми. Деякі моделі, особливо ті, що використовують LSTM або архітектуру Transformer з дуже глибин, мають високі обчислювальні вимоги [21]. Проблема помилкових розпізнавань у моменти відсутності жесту, як у моделі Stronger [8], також потребує вирішення. Оптимізація моделей для онлайн-застосувань з метою зменшення затримки залишається актуальною задачею [3]. Крім того, індивідуальні відмінності у виконанні жестів можуть впливати на точність розпізнавання [2], а надійність систем залежить від якості вхідних даних.

Матеріали і методи дослідження.

Загальний опис розробленої системи розпізнавання жестів. Розроблена система виконує розпізнавання жестів рук у реальному часі на основі послідовних 3D-точок з відеопотоку. Актуальність цієї розробки зумовлена розвитком безконтактних інтерфейсів людина-комп'ютер для різних застосувань. Архітектура системи оптимізована для низької затримки та використовує ефективні методи обробки даних і класифікації.

Система включає отримання 3D-точок рук за допомогою Mediapipe [13] або інших сенсорних пристроїв, їх буферизацію та попередню обробку. Для класифікації жестів використовується одновимірна згорткова нейронна мережа DD-Net [6], яка була адаптована та оптимізована для розпізнавання жестів рук на основі скелетних даних у межах цієї роботи. Результати класифікації обробляються алгоритмом голосування для отримання надійного прогнозу.

Отримання та буферизація вхідних даних. Система розпізнавання жестів підтримує різні сенсорні пристрої для отримання вхідних даних, включаючи стандартні RGB-камери з Mediapipe [13], Intel RealSense та HoloLens 2 [14]. Гнучкість у виборі джерела дозволяє використовувати систему в різних сценаріях. Кожен сенсор має свої особливості щодо точності, вартості та умов використання. У цьому дослідженні використовувалася стандартна RGB-камера з Mediapipe як компроміс між вартістю, доступністю та точністю.

Для кожного кадру відеопотоку відбувається вилучення 3D-ключових точок рук за допомогою Mediapipe (при використанні RGB-камери). Точність вилучення ключових точок є критично важливою для якісного розпізнавання жестів. Mediapipe Hands надає інформацію про 21 ключову точку руки, і кожен жест у часі представляється як послідовність цих положень.

Для захоплення динаміки руху система використовує буфер на 16 кадрів, що працює за принципом ковзного вікна. Кадри в буфері перед обробкою організовуються у зворотному порядку, що надає системі найновіші кадри на початку послідовності для покращення розпізнавання динамічних жестів.

Попередня обробка даних. Отримані послідовності 3D-точок рук проходять етапи попередньої обробки для підвищення якості даних. Важливим етапом є обробка відсутніх даних. При короткочасних збоях у відстеженні руки деякі кадри можуть не містити дійсних 3D-точок. Для відновлення цілісності послідовності застосовується лінійна інтерполяція координат для кожного 3D-суглоба між сусідніми дійсними кадрами в межах невеликого ковзного вікна (3-5 кадрів).

Наступним етапом є нормалізація даних. Координати ключових точок кожного кадру нормалізуються для усунення варіацій масштабу, положення та міжкористувацьких відмінностей шляхом статистичного регулювання з використанням середнього значення та стандартного відхилення, розрахованих на навчальному наборі даних. Нормалізація забезпечує отримання нейронною мережею вхідних даних у подібному діапазоні до навчальних даних.

Ще одним важливим аспектом є підлаштування до частоти кадрів. Оскільки частота кадрів відеопотоку може відрізнятися від частоти навчальних даних, система виконує повторну вибірку кадрів. При вищій частоті вхідних даних вибираються фіксовані 16 кадрів через рівні проміжки часу,

а при нижчій може застосовуватися лінійна інтерполяція для отримання 16 кадрів у буфері. Це допомагає зберегти часовий контекст руху рук.

Генерування даних для навчання нейронної мережі. Генерується три типи ознак: різниці координат суглобів (JCD), "повільні" зміщення (M_{slow}) та "швидкі" зміщення (M_{fast}).

- Різниці координат суглобів (JCD).
  Обчислюються евклідові відстані між кожною парою з J суглобів для $W = 16$ кадрів, формуючи тензор розміром $(J \cdot (J-1)/2) \times W$.
- "Повільні" зміщення (M_{slow}).
  Обчислюються як різниця координат кожного суглоба на суміжних кадрах, формуючи тензор розміром $J \times (W-1)$.
- "Швидкі" зміщення (M_{fast}) обчислюються як різниця координат кожного суглоба на кадрах через один, формуючи тензор розміром $J \times (W/2-1)$.

Архітектура нейронної мережі розпізнавання жестів. Розроблена система використовує багатоканалову згорткову архітектуру нейронної мережі (рис. 1), яка включає три окремі гілки для обробки кожного з трьох типів згенерованих ознак (JCD, M_{slow} та M_{fast}). Такий підхід дозволяє кожній гілці спеціалізуватися на вилученні специфічних характеристик і відповідного типу ознак, а подальше об'єднання інформації з усіх гілок дає змогу отримати більш повне уявлення про виконуваний жест.

Рис. 1. Архітектура моделі розпізнавання жестів

Кожна з трьох згорткових гілок має схожу структуру та складається з серії згорткових блоків. Кожен згортковий блок включає одномірний згортковий шар (Conv1D), шар пакетної нормалізації (Batch Normalization) та шар активації Leaky ReLU. Одномірні згорткові шари ефективно обробляють послідовні дані, такі як часові ряди ознак. Пакетна нормалізація сприяє стабілізації процесу навчання, а функція активації Leaky ReLU вводить нелінійність у модель. Крім того, кожен згортковий блок містить резервне з'єднання (residual connection), що є характерною рисою архітектури ResNet [21]. Резервні з'єднання допомагають уникнути проблеми зникаючих градієнтів, що може виникати при навчанні глибоких нейронних мереж, забезпечуючи ефективніше зворотне поширення градієнта через шари.

Після обробки ознак у відповідних згорткових гілках, отримані представлення ознак подаються на дві різні класифікаційні голови: основну та допоміжну. Основна класифікаційна голова відповідає за безпосереднє прогнозування класу виконуваного жесту. Її структура включає додаткові згорткові блоки та шари Max Pooling для подальшого вилучення ознак, після чого йдуть

один або кілька повнозв'язних шарів та фінальний шар Softmax, який генерує розподіл ймовірностей за всіма класами жестів. Допоміжна класифікаційна голова призначена для покращення процесу навчання, особливо в умовах онлайн-розпізнавання, де часто зустрічаються кадри, що не містять жодних жестів. Ця голова класифікує вхідні дані на три категорії: статичний жест, динамічний жест та відсутність жесту. Важливою особливістю допоміжної голови є наявність модуля уваги, що складається з точкової згортки (1×1 згортки) та функції Softmax, дозволяє мережі виділяти найбільш важливі часові сегменти вхідної послідовності ознак та ігнорувати нерелевантні частини, таким чином підвищуючи ефективність обробки та точність розпізнавання

Алгоритм голосування для остаточного прогнозу. Алгоритм голосування за принципом автоналаштування ваговой більшості на основі ентропії (Entropy Weighted Voting) [19] підвищує точність прогнозування, застосовуючи зважене голосування до прогнозів, зроблених k моделями. Цей метод використовує ентропію для вимірювання невизначеності кожного окремого естиматора. Прогнози з високою ентропією (низька впевненість) мають менший вплив на кінцеве рішення. Ми адаптували цей алгоритм: зважування стосується не моделей (модель тут одна), але k послідовних прогнозів

Ключові етапи пропонованого алгоритму описано нижче.

1. Матриця апостеріорної імовірності. Для послідовності з k кадрів (або часових кроків), $P(x)$ збирає вихідні ймовірності, передбачені моделлю для кожного з m класів. У цьому випадку $P(x)$ складається з k послідовних прогнозів від одної й тієї ж моделі. Вищі ймовірності вказують на більшу впевненість щодо конкретного класу в даний момент часу, тоді як рівномірні розподіли свідчать про вищу невизначеність.

2. Обчислення ваги на основі ентропії. Ентропія кожного прогнозу $H_i(x)$ вимірює впевненість моделі для даного кадру (або часового кроку):

$$H_i(x) = -\sum_{j=1}^{m} P_{ij}(x) \cdot log\left(P_{ij}(x)\right) \quad (1)$$

де $P_{ij}(x)$ – значення ймовірності, привоєне моделлю j-ому класу для i-го кадру (або часового кроку).

3. Ваги обчислюються за допомогою експоненти негативної ентропії, щоб їхня сума дорівнювала одиниці:

$$w_i - \frac{exp(-H_i(x))}{\sum_{j=1}^{k} exp(-H_i(x))} \quad (2)$$

де $H_i(x)$ – ентропія i-го прогнозу.

4. Зважена матриця імовірності. Кориговані ймовірності $P'(x)$ створюються шляхом масштабування виходу кожного прогнозу відповідно до його ваги.

$$P'_{ij}(x) = w_i \cdot P_{ij}(x) \quad (3)$$

де $P_{ij}(x)$ – значення ймовірності, привоєне моделлю j-ому класу для i-го кадру (або часового кроку), а w_i – вага i-го прогнозу

5. Фінальне зважене голосування. Імовірності для кожного класу агрегуються по всій послідовності прогнозів:

$$p_j^{vote} = \sum_{i=1}^{k} P'_{ij}(x) \quad (4)$$

де $P'_{ij}(x)$ – значення зваженої ймовірності, привоєне моделлю j-ому класу для i-го кадру (або часового кроку).

Клас з найвищою кумулятивною ймовірністю серед p_j^{vote} є прогнозованим класом для всієї послідовності.

Результати дослідження та їх обговорення.

Для експериментів з метою оцінки розробленої моделі використовувалися набори даних NVGesture [21] та SHREC'22 [7], коротка характеристика яких наводиться нижче.

SHREC'22. Набір даних SHREC'22 містить безперервні 3D положення рук, зібрані в умовах змішаної реальності за допомогою HoloLens 2. Навчальна та тестова вибірки містять по 144 послідовності з 16 класами жестів, що чергуються з незначними рухами. Жести поділені на статичні, динамічні (грубі та точні) та періодичні, з анотаціями початкових і кінцевих кадрів. Дані зібрані різними людьми для кращої узагальненості.

NVGesture. Модифікований набір даних NVGesture містить понад 1500 відеопослідовностей з 25 жестами рук від 20 учасників. Жести поділяються на статичні та динамічні. Для використання з

моделлю була розроблена автоматизована процедура анотацій з Mediapipe для вилучення 2D та 3D координат суглобів. Застосовувалася фільтрація за розміром для усунення неоднозначностей з кількома руками в кадрі та інтерполяція (вікно 5 кадрів) для відновлення відсутніх даних через розмиття руху.

Методики оцінювання. Ефективність моделі оцінювалася за допомогою стандартних метрик класифікації:

- Accuracy: (TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)
- Recall: TP/(TP+FN)
- Precision: TP/(TP+FP)
- F1 score: 2*(precision*recall)/(precision+recall)

Процедура оцінки. Оцінювання включало тестування на контрольній вибірці NVGesture з використанням обчислених метрик та оцінку в реальному часі з вебкамерою (кожен жест повторювався тричі). Обидва етапи проводилися з використанням 3D- та 2D-координат суглобів.

Набір даних NVGesture. Результати тестування на наборі даних NVGesture (див. табл. 1) демонструють порівняння 2D та 3D даних.

Таблиця 1. Результати тестування моделі на тестових даних NVGesture

	Accuracy	**Recall**	**Precision**	**F1 score**
2D дані	0.794	0.794	0.763	0.768
3D дані	0.784	0.758	0.784	0.751

Використання 3D-даних дозволило досягти кращих результатів порівняно з оригінальною роботою для NVGesture (accuracy 0.74 з використанням лише кольору). Матриця заплутаності для контрольного набору даних NVGesture (рис. 2) виявила складнощі з розрізненням жестів, що виконуються схожими пальцями. Мануальна оцінка (див. табл. 2) показала кращу узагальненість моделі, навченої на 3D-даних, порівняно з 2D-даними.

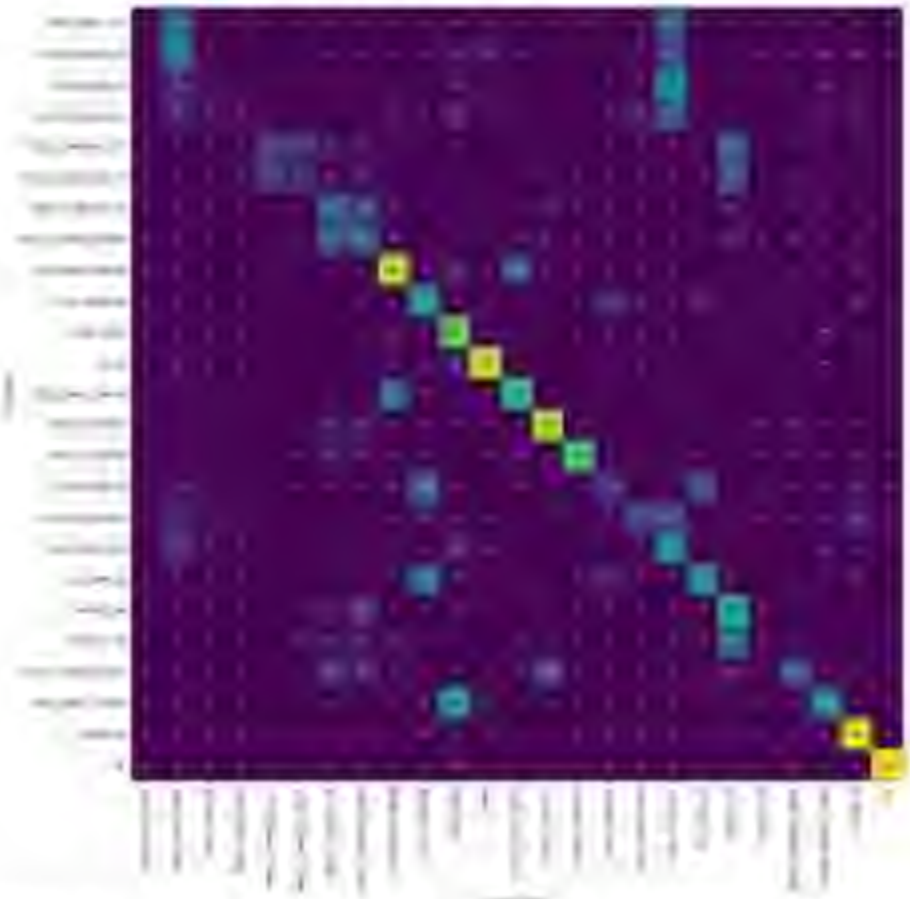


Рис. 2. Матриця заплутаності за результатами класифікації набору даних NVGesture (3D дані).

Таблиця 2. Результати тестування моделі мануально

Тип жесту	2D дані	3D дані
Статичний	0.345	0.893
Динамічний	0.567	0.712
Не жест	0.790	0.921

Приклади розпізнавання динамічних та статичних жестів під час мануальної перевірки виявили труднощі з розпізнаванням статичних жестів, що супроводжуються незначними рухами та складних жестів з перекритими пальцями.

Набір даних SHREC'22. Оцінювання на SHREC22 проводилося лише на 3D-даних. Результати представлено нижче (див. табл. 3). Матриця заплутаності для цього набору наведено на рис. 3.

Таблиця 3. Результати тестування моделі на тестових даних SHREC22

	Accuracy	Recall	Precision	F1 score
3D дані	0.924	0.924	0.926	0.924

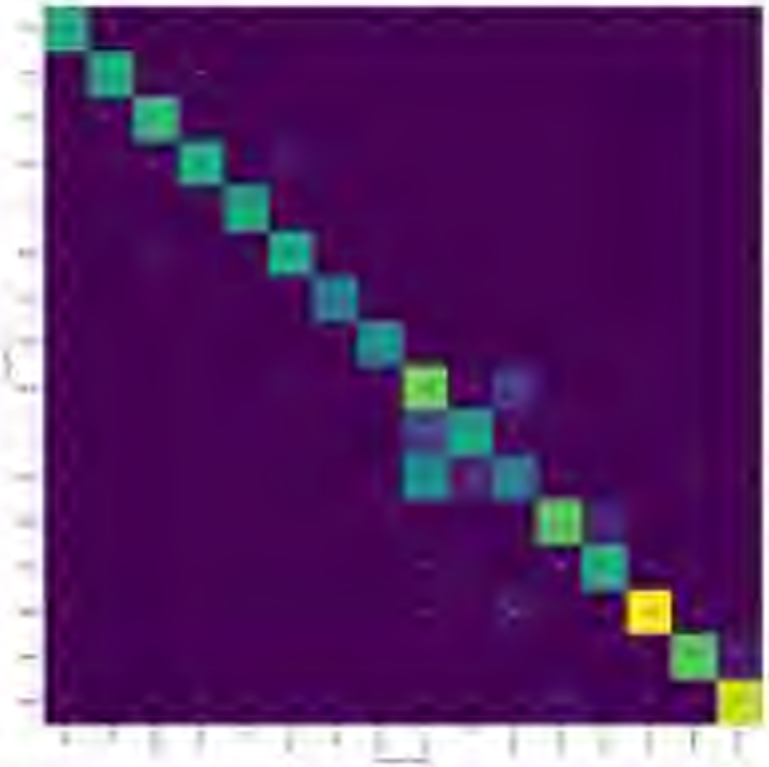


Рис. 3. Матриця заплутаності за результатами класифікації контрольного набору даних SHREC22.

Отримані результати (рис. 3 і табл. 3) підтверджують ефективність підходу на основі якісних 3D-даних для розпізнавання як статичних, так і динамічних жестів. Порівняння з 2D-даними та мануальне тестування не проводилися через специфіку набору даних SHREC22.

Обговорення отриманих результатів. Проведене дослідження було спрямоване на оцінку ефективності розробленої моделі розпізнавання жестів з використанням двох різних наборів даних: NVGesture та SHREC22. Результати, отримані на наборі даних NVGesture, показали, що використання 3D-координат суглобів рук забезпечує дещо вищу точність порівняно з використанням 2D-координат, особливо при мануальній оцінці в реальному часі. Це підкреслює важливість тривимірної інформації для розпізнавання жестів, оскільки вона дозволяє краще враховувати

глибину та складні рухи рук, що є критично важливим для динамічних жестів. Той факт, що розроблена модель на 3D-даних перевершила результати попередніх досліджень на цьому ж наборі даних, які використовували лише колірну інформацію, свідчить про ефективність обраного підходу до обробки скелетних даних.

Аналіз матриці заплутаності для NVGesture виявив певні складнощі моделі з розрізненням жестів, що виконуються схожими рухами пальців, наприклад, "MOVE_2_FINGERS_UP" та "MOVE_2_FINGERS_DOWN". Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення моделі в частині розрізнення тонких моторних рухів. Мануальна оцінка також виявила, що модель, навчена на 2D-даних NVGesture, гірше узагальнюється на реальні сценарії порівняно з моделлю на 3D-даних, що підкреслює важливість використання тривимірних даних для практичних застосувань.

Високі результати, отримані на наборі даних SHREC'22 з використанням 3D-даних, підтверджують, що якісні тривимірні дані значно покращують здатність моделі до розпізнавання як статичних, так і динамічних жестів. Відсутність можливості порівняння з 2D-даними на цьому наборі та проведення мануального тестування є обмеженням, пов'язаним зі специфікою збору даних SHREC'22.

Елемент наукової новизни. адаптація архітектури DD-Net для розпізнавання жестів рук у реальному часі з використанням як 2D, так і 3D даних, отриманих за допомогою фреймворку Mediapipe, комплексне оцінювання розробленої моделі на двох різних наборах даних (NVGesture та SHREC'22) з використанням як кількісних метрик, так і якісної оцінки в реальному часі; порівняльний аналіз ефективності розпізнавання жестів на основі 2D та 3D скелетних даних, що виявив кращу узагальненість 3D-даних у реальних умовах.

Практична значущість розроблена система розпізнавання жестів у реальному часі може бути використана в різноманітних застосуваннях, включаючи безконтактне керування пристроями, інтерфейси віртуальної та доповненої реальності, а також системи допомоги для людей з обмеженими можливостями. Результати дослідження підтверджують переваги використання 3D-даних для підвищення точності та надійності розпізнавання жестів, що є важливим для практичного впровадження таких систем. Виявлені обмеження моделі, такі як труднощі з розрізненням схожих жестів, вказують на напрями для подальшого вдосконалення систем розпізнавання жестів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі представлено розробку та оцінку моделі розпізнавання жестів рук у реальному часі. Експерименти з використанням наборів даних NVGesture та SHREC'22 продемонстрували ефективність підходу, особливо при використанні 3D-даних, які забезпечили вищу точність та кращу узагальненість у реальних умовах. Модель показала високі результати на наборі даних SHREC'22, що містить якісні тривимірні дані про жести. Незважаючи на досягнуті успіхи, існують певні обмеження, зокрема труднощі з розрізненням схожих жестів та статичних жестів з незначними динамічними рухами, що вказує на необхідність подальшої оптимізації алгоритмів класифікації. Отримані результати підтверджують потенціал розробленої системи для застосування в різних сферах, де потрібна інтуїтивна та безконтактна взаємодія. У майбутніх дослідженнях планується зосередитися на підвищенні робастності моделі до індивідуальних варіацій виконання жестів та розширенні її можливостей для розпізнавання більш складних та контекстно-залежних жестів.

Список бібліографічного опису

1. Iqbal, M.Z., Campbell, A.G. (2021). From luxury to necessity: Progress of touchless interaction technology. Technology in Society, Volume 67, November 2021, 101796, https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101796
2. Teslyuk, V., Chornenkyi, V., Tsapiv, V., & Kazymyra, I. (2024). Investigating hand gesture recognition models: 2D CNNs vs. visual transformers. *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 3688: Proc. of the 8th Int. conf. on computational linguistics and intelligent systems. Vol. III: Intelligent systems workshop, Lviv, Ukraine, Apr. 12-13, 2024, 29–38. CEUR-WS.org.
3. Tsapiv, V., & Kazymyra, I. (2024). Gesture Control in Real-time: a framework for 3D hand pose recognition for smart devices and touchless interfaces. In *1st International Scientific and Practical Conference on Computational Intelligence and Smart Systems*, 126–128.
4. Zhang, W., Lin, Z., Cheng, J., Ma, C., Deng, X., & Wang, H. (2020). STA-GCN: two-stream graph convolutional network with spatial–temporal attention for hand gesture recognition. *The Visual Computer*, 36(10–12), 2433–2444. https://doi.org/10.1007/s00371-020-01955-w.
5. Do, N.-T., Kim, S.-H., Yang, H.-J., & Lee, G.-S. (2020). Robust hand shape features for Dynamic Hand Gesture Recognition using multi-level feature LSTM. *Applied Sciences* (Basel, Switzerland), 10(18), 6293. https://doi.org/10.3390/app10186293
6. Yang, Fan, Yang Wu, Sakriani Sakti, and Satoshi Nakamura. (2019). Make Skeleton-based Action Recognition Model Smaller, Faster and Better. In Proceedings of the ACM Multimedia Asia. New York, NY, USA: ACM.

7. Emporio, M., Caputo, A., Giachetti, A., Cristani, M., Borghi, G., D'Eusanio, A., Le, M.-Q., Nguyen, H.-D., Tran, M.-T., Ambellan, F., Hanik, M., Nava-Yazdani, E., & von Tycowicz, C. (2022). SHREC 2022 track on online detection of heterogeneous gestures. *Computers & Graphics*, 107, 241–251. https://doi.org/10.1016/j.cag.2022.07.015
8. Vaezi Joze, Hamid Reza, Amirreza Shaban, Michael L. Iuzzolino, and Kazuhito Koishida. (2020). MMTM: Multimodal Transfer Module for CNN Fusion. In 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE.
9. Maghoumi, Mehran, and Joseph J. LaViola Jr. (2019). DeepGRU: Deep Gesture Recognition Utility. In *Lecture Notes in Computer Science*, 16–31. Cham: Springer International Publishing.
10. Caputo, F. M., Burato, S., Pavan, G., Voillemin, T., Wannous, H., Vandeborre, J., Maghoumi, M., Taranta, E.M., A., Razmjoo, Laviola, J.J., Mangaiaro, F., Pini, S., Borghi, G., Vezzani, R., Cucchiara, R., Nguyen, H., Tran, M., & Giachetti, A. (2019). SHREC 2019 Track: Online Gesture Recognition.
11. Song, J. H., Kong, K., & Kang, S. J. (2022). Dynamic hand gesture recognition using improved spatio-temporal graph convolutional network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*: A Publication of the Circuits and Systems Society, 32(9), 6227–6239. https://doi.org/10.1109/tcsvt.2022.3165069
12. Miah, A. S. M., Hasan, M. A. M., & Shin, J. (2023). Dynamic hand gesture recognition using multi-branch attention based graph and general deep learning model. *IEEE Access*: Practical Innovations, Open Solutions, 11, 4703–4716. https://doi.org/10.1109/access.2023.3235368
13. Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C., & Grundmann, M. (2020). MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. ArXiv, abs/2006.10214.
14. *HoloLens 2 gestures for authoring and navigating in Dynamics 365 Guides*. (n.d.). Microsoft.com. Retrieved November 15, 2024, from https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/authoring-gestures-hl2
15. *Oculus quest 2 review* (n.d.). GSMArena. Retrieved November 25, 2024, from https://www.gsmarena.com/oculus_quest_2_-review-news-46255.php
16. Bhaumesh, C., Prabhu, P. B. M., & Pavan, K. B. N. (2023). A comprehensive review of leap motion controller-based hand gesture datasets. In arXiv [cs.HC]. http://arxiv.org/abs/2311.04373
17. Małecki, K., Nowosielski, A., & Kowalicki, M. (2020). Gesture-based user interface for vehicle on-board system: A questionnaire and research approach. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, *10*(18), 6620. https://doi.org/10.3390/app10186620
18. Quentin de Smedt, Hazem Wannous, Jean-Philippe Vandeborre, Joris Guerry, Bertrand Le Saux, et al.. SHREC'17 Track: 3D Hand Gesture Recognition Using a Depth and Skeletal Dataset. 3DOR - 10th Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, Apr 2017, Lyon, France. pp.1-6, 10.2312/3dor.20171049. xffff, xffff. hal-01563505. xffff
19. Li, R., & Wang, X. (2017). Self-adaptive weighted majority vote algorithm based on entropy. *2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, 73–77.
20. Molchanov, P., Yang, X., Gupta, S., Kim, K., Tyree, S., & Kautz, J. (2016). Online detection and classification of dynamic hand gestures with recurrent 3D convolutional neural networks. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4207–4215.
21. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.

References

1. Iqbal, M.Z., Campbell, A.G. (2021). From luxury to necessity: Progress of touchless interaction technology. *Technology in Society*, Volume 67, November 2021, 101796, https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101796
2. Teslyuk, V., Chomenkyi, V., Tsapiv, V., & Kazymyra, I. (2021). Investigating hand gesture recognition models: 2D CNNs vs. visual transformers. *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 3088: Proc. of the 8th Int. conf. on computational linguistics and intelligent systems. Vol. III: Intelligent systems workshop, Lviv, Ukraine, Apr. 12-13, 2024, 29–38. CEUR-WS.org.
3. Tsapiv, V., & Kazymyra, I. (2024). Gesture Control in Real-time: a framework for 3D hand pose recognition for smart devices and touchless interfaces. In *1st International Scientific and Practical Conference on Computational Intelligence and Smart Systems*, 126–128.
4. Zhang, W., Lin, Z., Cheng, J., Ma, C., Deng, X., & Wang, H. (2020). STA-GCN: two-stream graph convolutional network with spatial–temporal attention for hand gesture recognition. *The Visual Computer*, *36*(10–12), 2433–2444. https://doi.org/10.1007/s00371-020-01955-w
5. Do, N.-T., Kim, S.-H., Yang, H.-J., & Lee, G.-S. (2020). Robust hand shape features for Dynamic Hand Gesture Recognition using multi-level feature LSTM. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, *10*(18), 6293. https://doi.org/10.3390/app10186293
6. Yang, Fan, Yang Wu, Sakriani Sakti, and Satoshi Nakamura. (2019). Make Skeleton-Based Action Recognition Model Smaller, Faster and Better. In Proceedings of the ACM Multimedia Asia. New York, NY, USA: ACM.
7. Emporio, M., Caputo, A., Giachetti, A., Cristani, M., Borghi, G., D'Eusanio, A., Le, M.-Q., Nguyen, H.-D., Tran, M.-T., Ambellan, F., Hanik, M., Nava-Yazdani, E., & von Tycowicz, C. (2022). SHREC 2022 track on online detection of heterogeneous gestures. *Computers & Graphics*, 107, 241–251. https://doi.org/10.1016/j.cag.2022.07.015
8. Vaezi Joze, Hamid Reza, Amirreza Shaban, Michael L. Iuzzolino, and Kazuhito Koishida. (2020). MMTM: Multimodal Transfer Module for CNN Fusion. In 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE.
9. Maghoumi, Mehran, and Joseph J. LaViola Jr. (2019). DeepGRU: Deep Gesture Recognition Utility. In *Lecture Notes in Computer Science*, 16–31. Cham: Springer International Publishing.
10. Caputo, F.M., Burato, S., Pavan, G., Voillemin, T., Wannous, H., Vandeborre, J., Maghoumi, M., Taranta, E.M., A., Razmjoo, Laviola, J.J., Mangaiaro, F., Pini, S., Borghi, G., Vezzani, R., Cucchiara, R., Nguyen, H., Tran, M., & Giachetti, A. (2019). SHREC 2019 Track: Online Gesture Recognition.

11. Song, J.-H., Kong, K., & Kang, S.-J. (2022). Dynamic hand gesture recognition using improved spatio-temporal graph convolutional network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology: A Publication of the Circuits and Systems Society*, *32*(9), 6227–6239. https://doi.org/10.1109/tcsvt.2022.3165069
12. Miah, A. S. M., Hasan, M. A. M., & Shin, J. (2023). Dynamic hand gesture recognition using multi-branch attention based graph and general deep learning model. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, *11*, 4703–4716. https://doi.org/10.1109/access.2023.3235368
13. Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C., & Grundmann, M. (2020). MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. *ArXiv*. /abs/2006.10214.
14. *Hololens 2 gestures for authoring and navigating in Dynamics 365 Guides*. (n.d.). Microsoft.com. Retrieved November 25, 2024, from https://learn.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/authoring-gestures-hl2
15. *Oculus quest 2 review*. (n.d.). GSMArena. Retrieved November 25, 2024, from https://www.gsmarena.com/oculus_quest_2__review-news-46255.php
16. Bhanesh, C., Prabhu, P. B. M., & Pavan, K. B. N. (2023). A comprehensive review of leap motion controller-based hand gesture datasets. In *arXiv [cs.HC]*. http://arxiv.org/abs/2311.04373
17. Małecki, K., Nowosielski, A., & Kowalicki, M. (2020). Gesture-based user interface for vehicle on-board system: A questionnaire and research approach. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, *10*(18), 6620. https://doi.org/10.3390/app10186620
18. Quentin de Smedt, Hazem Wannous, Jean-Philippe Vandeborre, Joris Guerry, Bertrand Le Saux, et al.. SHREC'17 Track: 3D Hand Gesture Recognition Using a Depth and Skeletal Dataset. 3DOR - 10th Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, Apr 2017, Lyon, France. pp.1-6, 10.2312/3dor.20171049. xffff. xffff. hal-01563505. xffff
19. Li, R., & Wang, X. (2017). Self-adaptive weighted majority vote algorithm based on entropy. *2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*, 73–77.
20. Molchanov, P., Yang, X., Gupta, S., Kim, K., Tyree, S., & Kautz, J. (2016). Online detection and classification of dynamic hand gestures with recurrent 3D convolutional neural networks. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4207–4215.
21. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-18
УДК 004.9
Коломоєць Геннадій Павлович, к.ф.-м.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-3662-0316
Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна

РОЗРОБКА ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ БІБЛІОТЕКИ JAVA ДЛЯ ВЗАЄМОДІЇ З ПЛАТФОРМОЮ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ WOOCOMMERCE

Коломоєць Г. П. Розробка об'єктно-орієнтованої бібліотеки Java для взаємодії з платформою електронної комерції WooCommerce. Вказано проектування модулі класів та розробка на її основі Java-бібліотеки із засобами для роботи з сутностями понятійної платформи електронної комерції WooCommerce, включаючи товари, покупців та замовлення. Перевагами розробленої бібліотеки є підвищена безпека використання типів на рівні компілятора, досягнута за рахунок використання перечислень (англ. enumerations) та обгорток типів для атрибутів класів моделі, на противагу роботі з рядками при організації взаємодії з безпосереднім використанням частин WooCommerce REST API. Спроектована модель використовує засоби програмної бібліотеки Project Lombok для зменшення обсягу шаблонного коду, забезпечення доступу до атрибутів класів у відповідності з документацією WooCommerce REST API та визначення методів "білдерів" об'єкта із можливістю ручної ініціалізації їх властивостей. Засобами бібліотеки Gson реалізована користувацька серіалізація-десеріалізація даних атрибутів об'єктів WooCommerce до більшручних та безпечних при програмуванні типів даних. Для організації запиту та підтримки авторизації використовується бібліотека OkHttp. Програмна бібліотека має відкритий програмний код і представлена на GitHub. Її використання може мати корисність при організації взаємодії програмного системи на Java з Інтернет-магазинами на платформі WooCommerce.

Ключові слова: платформа електронної комерції WooCommerce, програмна бібліотека, класи об'єктної моделі, WooCommerce REST API, безпека типів, серіалізація-десеріалізація даних.

Kolomoiets H. Development of the Object-Oriented Java Library for Interaction with the WooCommerce E-Commerce Platform. A class model was designed and a Java library was developed based on it with tools for working with entities of the popular e-commerce platform WooCommerce, including products, customers, and orders. The advantages of the developed library are increased type safety at the compilation level, achieved by using enumerations and object types for model class attributes, as opposed to working with strings when organizing interaction with direct use of WooCommerce REST API requests. The designed model uses the tools of the Project Lombok software library to reduce boilerplate code, control access to class attributes in accordance with the WooCommerce REST API documentation, and define object "builder" methods with the ability to flexibly initialize their properties. The Gson library tools implemented custom serialization-deserialization of some WooCommerce object attributes to more convenient and secure data types for programming. The OkHttp library was used to organize requests with authorization support. The proposed library is open source and available on GitHub. Its use can be useful in organizing the interaction of Java software systems with online stores on the WooCommerce platform.

Keywords: WooCommerce e-commerce platform, software library, object model classes, WooCommerce REST API, type safety, data serialization-deserialization.

Постановка проблеми. Електронна комерція є невід'ємною частиною людського життя і забезпечує дручність та ефективність маркетингу та торгівлі. Велика частка сайтів електронної комерції побудована на базі систем керування контентом, серед яких безумовними лідером є WordPress [1]. Додання до сайту на базі WordPress плагіну платформи електронної комерції WooCommerce перетворює його на Інтернет-магазин з широким функціоналом сучасних інструментів торгівлі та маркетингу [2]. Популярність цієї системи керування контентом та платформи електронної комерції пояснюється, зокрема, їх вільним розповсюдженням та відкритим вихідним кодом. Важливою перевагою WooCommerce є наявність прикладного програмного інтерфейсу WooCommerce REST API, який робить можливим обмін даними між Інтернет-магазинами та іншими інформаційними системами та програмними застосунками [3]. Це дозволяє, наприклад, розробляти мобільні клієнти Інтернет-магазинів з підтримкою функціоналу, що надає WooCommerce: перегляд та замовлення товарів покупцями, додання та оновлення характеристик товарів менеджерами, управління замовленнями покупців тощо. Дане дослідження присвячене проблемі проектування та створення програмної бібліотеки, використання якої підвищує ефективність та забезпечує безпеку типів при організації взаємодії програмних систем, створених для платформи Java, з Інтернет-магазинами на базі WooCommerce.

Аналіз останніх публікацій. Необхідно зазначити, що WooCommerce REST API – це фактично надбудова, яка використовує можливості WordPress REST API, додаючи власні кінцеві точки REST для товарів, замовлень, клієнтів, купонів тощо та реєструючи їх функціями WordPress [4]. Програмні бібліотеки для взаємодії з Інтернет-магазинами засобами WooCommerce REST API є корисними інструментами, які надають розробникам більш зручні та ефективні програмні засоби, ніж безпосереднє формування запитів. На сайті підтримки WooCommerce REST API [3] наведені

посилання на програмні бібліотеки для мов програмування JavaScript [5], Python [6], PHP [7] та Ruby [8]. Дослідження цих бібліотек показало, що вони не містять класів об'єктної моделі WooCommerce, а є "огортками" для формування REST-запитів. При використанні бібліотек такого типу дані об'єктів WooCommerce передаються у вигляді асоціативних масивів рядків "ключ-значення", а не як об'єкти моделі WooCommerce [9]. Такий підхід не є типобезпечним та погіршує можливості розширення функціоналу бібліотек для нового функціоналу WooCommerce. Окрім того, вказані бібліотеки працюють з WooCommerce REST API попередніх версій, на сьогодні актуальною є 3 версія WooCommerce REST API, яка вимагає використання WooCommerce версії, більше 3.5.x та WordPress версії більше 4.4 (на момент написання статті актуальними є версії 9.8.1 та 6.7.2, відповідно) [10]. Зауважимо, що посилання на бібліотеку для платформи Java на сайті підтримки WooCommerce REST API [3] відсутнє.

Постановка завдання. Метою цієї роботи було створення Java-бібліотеки, що спрощує інтеграцію з платформою електронної комерції WooCommerce через REST API шляхом реалізації об'єктної моделі основних сутностей платформи та підтримки типобезпечної роботи з даними.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації мети дослідження на локальному комп'ютері було встановлене середовище для Веб-розробки WampServer, у ньому розгорнута система керування контентом WordPress, у якій встановлений плагін WooCommerce та створений Інтернет-магазин з тестовими товарами. Програмний код розроблявся у середовищі програмування IntelliJ IDEA із підтримкою технології побудови проєктів Apache Maven. Увесь напрацьований код є відкритим [11] та може бути вільно використаний на умовах ліцензії MIT.

В рамках цього дослідження були поставлені завдання розробити програмний код для отримання програмою-клієнтом на Java даних опублікованого в Інтернет-магазині товару, розміщення замовлення на цей товар та реєстрацію покупця Інтернет-магазину.

Для можливості комунікації зовнішніх програмних засобів з Веб-сервісами WooCommerce необхідно створити криптографічний ключ та пароль, які будуть ідентифікувати користувача програмного клієнта. Це можна зробити у налаштуваннях WooCommerce на вкладці *Advanced REST API*. Зазначимо, що існує можливість створення ключа, який буде дозволяти тільки читання даних, та ключа, який буде дозволяти і читання, і створення даних у Інтернет-магазині, було обрано другий варіант. Було встановлено, що локальний сайт (localhost) не використовує криптографічно захищений протокол передачі даних між клієнтом та сервером (HTPS), а Веб-сервіси WooCommerce передбачають саме його використання. Для дослідницького середовища вдалося обійти цю проблему за допомогою інструкції `SetEnv HTTPS on` у файлі налаштування Веб-сервера Apache .htaccess.

У якості засобу організації програмної взаємодії Java-клієнта з Веб-сервісами WooCommerce була обрана програмна бібліотека OkHttp [12], розроблена Square Open Source. Її вибір зумовлений підтримкою сучасних комунікаційних протоколів, широкою функціональністю та простотою використання [13], зокрема для передачі у HTTP-заголовку даних автентифікації запитів. Як рішення для серіалізації-десеріалізації об'єктів WooCommerce до файлу формату JSON (стандартний для WooCommerce формат серіалізації) було вирішено обрати бібліотеку Gson [14], розроблену Google, яка надає можливості налаштування користувацької серіалізації-десеріалізації об'єктів та демонструє найбільшу швидкість роботи серед конкурентів [15].

Архітектура програмної бібліотеки передбачає каталог `model` із класами, які відповідають об'єктам WooCommerce (Рис. 1). Цей каталог має підкаталоги `customer`, `order` та `product` із класами та перечисленнями (англ. enumerations), які містять інформацію, що відноситься до відповідних об'єктів програмної моделі WooCommerce. Підкаталог `customer` містить клас-сутність `Customer` з атрибутами покупця Інтернет-магазину, а також перечислення `CustomerRole` з можливими ролями (окрім покупця, WooCommerce передбачає також роль менеджера магазину) та клас `CustomerMetaData` з додатковими властивостями покупця. У підкаталозі `order` розміщені класи-сутності, пов'язані з замовленнями товарів WooCommerce самим замовленням (`Order`) та інформацією про товар у замовленні (`ProductItem`). Окрім того, цей підкаталог містить перечислення з підтримуваними WooCommerce валютами (`Currency`) та статусами обробки замовлення (`OrderStatus`). Застосування перечислень є сталою практикою, що зменшує вірогідність помилок при використанні обмеженої кількості постійних значень та підтримує безпеку використання типів. У підкаталозі `product` розміщені класи-сутності, пов'язані

з товарами WooCommerce – сам товар (`Product`), категорія товару (`ProductCategory`), атрибут товару (`ProductAttribute`), та фізичні розміри товару (`Dimensions`). Окрім того, цей підкаталог містить перечислення з підтримуваними типами товарів (`ProductType`) та статусами публікації товару (`ProductStatus`). Каталог `model`, окрім підкаталогів, містить класи-сутності, що використовуються різними об'єктами моделі – інформацію про платіжні реквізити (`Billing`) та про адресу доставки (`Shipping`) товару, а також клас-сутність `Image`, який використовується для зображень в Інтернет-магазині.

Рис. 1. Архітектура бібліотеки

При побудові моделі бібліотеки з метою повторного використання коду та можливості розширення функціоналу використовувалися технології об'єктно-орієнтованого проектування: композиція об'єктів моделі, наприклад, використання об'єктів класу `Image` для товарів та категорій, та успадкування об'єктів `Billing` і `Shipping` (Рис. 2).

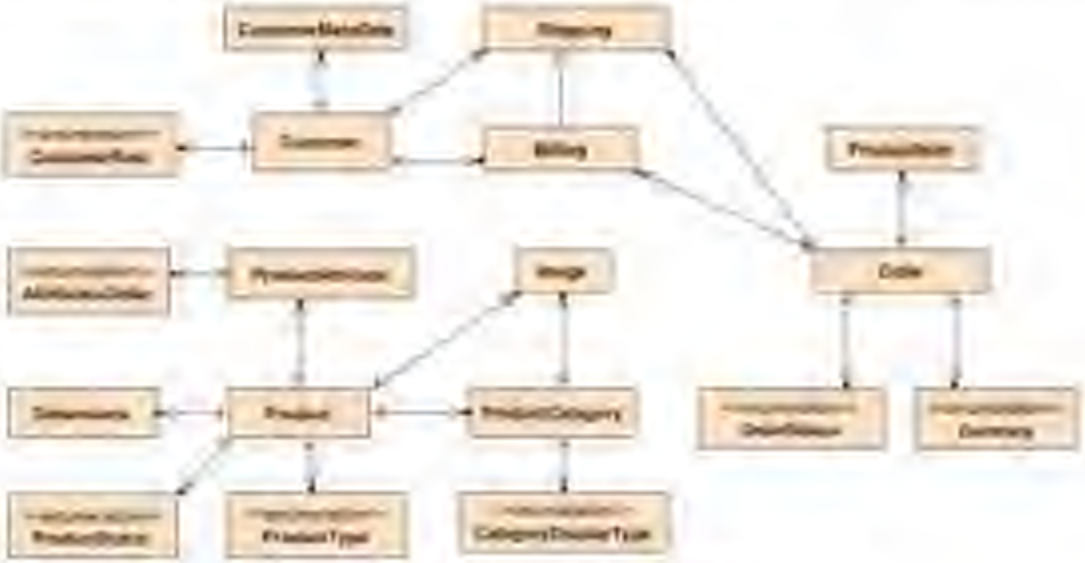


Рис. 2. UML діаграма класів моделі бібліотеки

Засобами програмної бібліотеки Project Lombok [16], окрім усунення з вихідного коду класів шаблонного коду, були організовані передбачені документацією Веб-сервісів WooCommerce доступи до атрибутів – тільки для читання або для читання та запису [9]. Також, враховуючи, що при створенні об'єктів встановлення усіх властивостей не є обов'язковим, у класах моделі були розроблені користувацькі методи-будівельники об'єктів (англ. builder) [17], наприклад:

```
import lombok.*;
import ua.edu.znu.wcrestapp.model.Billing;
import ua.edu.znu.wcrestapp.model.Shipping;
import java.time.LocalDateTime;

@Data
public class Customer {
    @Builder(builderMethodName = "customerBuilder")
    public static Customer of(String first_name, String last_name,
                              String email, String username, String password,
                              Billing billing, Shipping shipping) {
        Customer customer = new Customer();
        customer.setFirst_name(first_name);

        return customer;
    }

    @Setter(AccessLevel.NONE)
    private Long id;
    private String first_name;

    @Setter(AccessLevel.NONE)
    private String password;
    @Setter(AccessLevel.NONE)
    private CustomerRole role;
    @Setter(AccessLevel.NONE)
    private LocalDateTime date_created;

}
```

Використання методу-будівельника із частковим встановленням атрибутів та відсутністю можливості встановлення атрибутів тільки для читання може виглядати так:

```
Customer.customerBuilder()
    .last_name(lastName)
    .email(email)
    .username(username)
    .password(password)
    .build();
```

Для доступу до Веб-сервісів WooCommerce використовувалася базова адреса

http://localhost/назва_сайту/wp-json/wc/v3,

що забезпечує роботу з актуальною 3 версією REST API, підтримуваною поточними версіями WordPress та WooCommerce.

Типи даних атрибутів сутностей більшою мірою співпадали з зазначеними у документації [10], але були й виключення, пов'язані з більш доцільними для обробки класами типами, – наприклад, використання значень Double та Boolean замість рядка для значень ціни та атрибутів з булевими значеннями, а також об'єкта java.time.LocalDateTime для дат та часу. Бібліотека Gson передбачає можливість створення для об'єктних типів користувацьких серіалізаторів та десеріалізаторів [18], що і було зроблено.

Архітектура розробленої бібліотеки передбачає каталог api (Рис. 1) з класами, що містять методи роботи з об'єктами моделі: CustomerApi, OrderApi, ProductApi, а також клас Config з методами конфігурування бібліотеки та користувацький адаптер серіалізації-десеріалізації.

Клас `CustomerApi` містить методи створення покупця, реєстрації його у магазині та метод отримання покупця за ідентифікатором. Клас `OrderApi` містить методи створення замовлення товару або декількох товарів та метод реєстрації замовлення у Інтернет-магазині. Клас `ProductApi` містить метод отримання товару за ідентифікатором. Всі методи, які формують REST-запити, додають до заголовків запиту криптографічний ключ та пароль, що містяться у текстовому файлі `credentials.properties` у підкаталозі ресурсів бібліотеки. Доступ до цього файлу організований засобами класу java.util.Properties стандартної бібліотеки Java.

Клас `Config` містить метод отримання базової адреси сайту Інтернет-магазину, яка зберігається у текстовому файлі `config.properties` у каталозі ресурсів бібліотеки, метод отримання криптографічного ключа та пароля з файлу-ресурсу `credentials.properties` та отримання об'єкта Gson з зареєстрованим класом-адаптером, що забезпечує коректувальну серіалізацію-десеріалізацію дати та часу.

У корені проєкту також міститься клас `ClientUsageDemo` з демонстрацією використання функціоналу бібліотеки. Код цього класу може бути взятий як приклад розробниками, що використовуватимуть бібліотеку.

Розроблені засоби бібліотеки були апробовані для отримання даних товару, опублікованого в Інтернет-магазині. Для цього товару програмі передавався ідентифікатор товару у Інтернет-магазині. На Рис. 3 представлені властивості товару та отримані засобами бібліотеки дані цього товару у форматі JSON (видалені значення ідентифікатору товару, дані якого отримуються).

а)

б)

Рис. 3. Властивості товару Інтернет-магазина (а) та отримані дані у форматі JSON (б)

Також засобами бібліотеки було підготовлено замовлення товару та передане до Інтернет-магазину. На Рис. 4 представлені дані замовлення у програмі та зареєстроване замовлення у Інтернет-магазині.

```
public Order prepareOrder(ProductItem[] products) {
    Shipping shipping = Shipping.builder()
        .first_name("John")
        .last_name("Doe")
        ...
        .build();
    ...
    Order order = Order.orderBuilder()
        .line_items(products)
        .billing(billing)
        ...
        .build();
    return order;
}
```

б)

б)

Рис. 4. Дані замовлення товару (а) та зареєстроване у Інтернет-магазині замовлення (б)

Також засобами бібліотеки була виконана реєстрація покупця Інтернет-магазину. На Рис. 5 представлені дані покупця у програмі та його реєстрація у Інтернет-магазині.

```
CustomerApi customerApi = new CustomerApi();
String firstName = "Марія";
String lastName = "Шевченко";
String email = "mariia@gmail.com";
String username = "maria";
...
Customer.customerBuilder()
        .first_name(firstName)
        .last_name(lastName)
        .email(email)
        .username(username)
        .password(password)
        .billing(billing)
        .shipping(shipping)
        .build();
```

а)

б)

Рис. 5. Дані покупця Інтернет-магазину (а) та зареєстрований у Інтернет-магазині покупець (б)

Апробація продемонструвала ефективність використання бібліотеки, яка полягала у зручності та безпеці типів на рівні компіляції – використанні клієнтською кодовою базою методів, що приймають як аргументи і працюють з об'єктами моделі WooCommerce, наприклад, `public Customer createCustomer(Customer customer, OkHttpClient client, Gson gson, Config config)`, `public Order prepareOrder(ProductItem[] products)` тощо. У разі використання програмних бібліотек, що представляють собою скрипти [4-7], вхідні дані передаються як рядки [8], що ускладнює їх використання та з більшою вірогідністю може призвести до помилок.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті проведення цього дослідження спроектована модель класів, які відповідають сутностям платформи електронної комерції WooCommerce. На основі цієї моделі розроблена програмна бібліотека, що дозволяє працювати з об'єктами WooCommerce клієнтському коду на Java. Бібліотека містить засоби роботи з товарами, замовленнями та покупцями. У подальшому планується розширення бібліотеки для підтримки роботи з варіативними товарами та купонами.

Список бібліографічного опису

1. Historical trends in the usage statistics of content management systems. URL: https://w3techs.com/technologies/history_overview/content_management (access date: 15.05.2025).
2. Eva Nina Building Your Online Store with WordPress and WooCommerce : монографія / І. Нина – Computer, APress, 2018. – 196 p.
3. WooCommerce REST API URL: https://woocommerce.com/document/woocommerce-rest-api/ (access date: 15.05.2025).

4. Sufyan bin Uzayr Learning WordPress REST API. Packt Publishing, 2016. 209 p.
5. WooCommerce REST API - JavaScript Library. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
6. A Python wrapper for the WooCommerce REST API. URL: https://pypi.org/project/WooCommerce/ (access date: 15.05.2025).
7. A PHP wrapper for the WooCommerce REST API. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
8. WooCommerce API - Ruby Client. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
9. Libraries (Official) to Work with WooCommerce REST API and Examples. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
10. Technical Documentation for the WooCommerce REST API. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
11. WooCommerceRESTClientApp. Репозиторій проекту Java-клієнта для REST Веб-сервісів платформи електронної комерції WooCommerce. URL: [illegible] (дата звернення: 15.05.2025).
12. OkHttp. Офіційний сайт. URL: https://square.github.io/okhttp (access date: 15.05.2025).
13. Tom Akehurst Which Java HTTP client should I use in 2024? URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
14. Gson. Офіційний сайт. URL: https://github.com/google/gson (access date: 15.05.2025).
15. Nick Andrews The Ultimate JSON Library: JSON.simple vs. GSON vs. Jackson vs. JSONP. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
16. Project Lombok. Офіційний сайт. URL: https://projectlombok.org (access date: 15.05.2025).
17. Using Lombok's @Builder Annotation. URL: https://www.baeldung.com/lombok-builder (access date: 15.05.2025).
18. Gson User Guide. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).

References

1. Historical trends in the usage statistics of content management systems. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
2. Lisa Sims Building Your Online Store with WordPress and WooCommerce : монографія / L. Sims. – Сonyers : APress, 2018. – 196 p.
3. WooCommerce REST API. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
4. Sufyan bin Uzayr Learning WordPress REST API. Packt Publishing, 2016. 209 p.
5. WooCommerce REST API - JavaScript Library. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
6. A Python wrapper for the WooCommerce REST API. URL: https://pypi.org/project/WooCommerce/ (access date: 15.05.2025).
7. A PHP wrapper for the WooCommerce REST API. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
8. WooCommerce API - Ruby Client. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
9. Libraries (Official) to Work with WooCommerce REST API and Examples. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
10. Technical Documentation for the WooCommerce REST API. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
11. WooCommerceRESTClientApp. Java client project repository for REST Web services of the WooCommerce e-commerce platform. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
12. OkHttp. Official site. URL: https://square.github.io/okhttp/ (access date: 15.05.2025).
13. Tom Akehurst Which Java HTTP client should I use in 2024? URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
14. Gson. Official site. URL: https://github.com/google/gson (access date: 15.05.2025).
15. Nick Andrews The Ultimate JSON Library: JSON.simple vs. GSON vs. Jackson vs. JSONP. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).
16. Project Lombok. Official site. URL: https://projectlombok.org (access date: 15.05.2025).
17. Using Lombok's @Builder Annotation. Retrieved from: https://www.baeldung.com/lombok-builder (access date: 15.05.2025).
18. Gson User Guide. URL: [illegible] (access date: 15.05.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-19
УДК 004.42:519.86
Кошелюк Віктор Андрійович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4136-5087
Тимчук Владислав Володимирович, магістр
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОРЯДКУ СОРТУВАННЯ У ВПОРЯДКОВАНИХ СПИСКАХ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ

Кошелюк В. А., Тимчук В. В. Методи організації порядку сортування у впорядкованих списках у програмному забезпеченні. У сучасному програмному забезпеченні, де важливу роль відіграє обробка впорядкованих списків даних, особливо у веб-додатках, системах керування завданнями, контентом чи іншими структурованими сутностями, критичним аспектом стає правильна організація порядку елементів. Найпоширенішим способом зберігання таких структур є реляційні бази даних, де забезпечення порядку вимагає додаткової уваги. Основними підходами є використання окремого числового поля (індексу порядку) або побудова зв'язних структур, де кожен запис містить посилання на попередній чи наступний. Однак зі зростанням кількості елементів виникає проблема ефективного оновлення цих значень при зміні порядку, особливо при переміщенні елементів у списку. У зв'язку з цим постає необхідність ґрунтовного аналізу сучасних підходів до організації та підтримки впорядкованості списків, зокрема методів оптимізації значень сортування з урахуванням резервного простору між суміжними індексами. Такий підхід дозволяє уникнути частих операцій з перерахунку позицій елементів під час зміни їх порядку, що, своєю чергою, сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню навантаження на базу даних. Серед альтернативних рішень заслуговує на увагу використання горизонтального розширення порядкових значень, наприклад, шляхом застосування дробових або лексикографічних форматів. Окремо розглядаються переваги та недоліки використання зв'язних списків у порівнянні з традиційним підходом до сортування за значенням порядку. Для порівняння підходів проводиться оцінка з погляду точності та швидкодії, ефективності реалізації, та можливості масштабованості списків.
Ключові слова: база даних, сортування, оптимізація, індекс порядку, впорядкований список, зв'язний список.

Koshelіuk V., Tymchuk V. Methods of organizing sorting in ordered lists in software systems. In modern software systems, particularly in web applications, task management systems, content management platforms, and other structured data environments, the correct organization of item order in ordered lists plays a critical role. The most common method for storing such structures involves relational databases, where maintaining item order requires additional attention. The primary approaches include the use of a separate numeric field (order index) or the construction of linked structures, in which each record contains a reference to the previous or next item. However, as the number of elements grows, updating these values efficiently becomes a challenge, especially when items are repositioned within the list. This creates the need for a thorough analysis of modern approaches to organizing and maintaining list order, particularly methods for optimizing sorting values by incorporating reserved space between adjacent indices. Such approach helps to avoid frequent re-indexing operations when positions change, which in turn improves performance and reduces database load. Among alternative solutions, horizontal expansion of ordering values, such as the use of fractional or lexicographic formats, deserves particular attention. Additionally, the advantages and disadvantages of using linked lists compared to traditional sorting by order values are examined. To compare the approaches, an evaluation is conducted based on accuracy and performance, implementation efficiency, and a possibility of scaling lists.
Keywords: database, sorting, optimization, sorting index, sorted list, linked list

Постановка проблеми. У багатьох програмних системах постає завдання зберігання елементів у довільному порядку, заданому користувачем, із можливістю динамічного переміщення цих елементів. Наприклад, у таких програмних продуктах, як: системи управління завданнями, аудіо та відео програвачі, додатки для нотаток, платформи для навчання та у багатьох інших видах програмного забезпечення, користувачі мають бажання сформувати та користуватися довільними списками, у яких елементи розташовані у порядку, заданому самим користувачем. Так як постійне зберігання даних у пам'яті сервера чи комп'ютера практично неможливо через її обмежений об'єм, використовуються бази даних. Хоч порядок елементів, теоретично, може визначатися їх фізичним розташуванням у базі даних, проте це є поганою практикою, оскільки у такому випадку, при перенесенні записів потрібно перезаписувати велику кількість даних, що є поганою практикою з боку затраченого часу та інших ресурсів. Тому у практику розробників програмного забезпечення входить створення додаткового поля даних, яке використовується для впорядкування. Зазвичай це поле задає сортувальний ключ або структуру посилань між записами.

Задача полягає в ефективній підтримці цього порядку при додаванні, переміщенні чи видаленні елементів, а також уникати необхідності повного пересортування всіх даних при кожному внесенні змін. Окрім того, важливо розглянути оптимізацію та нормалізацію значень порядку, коли між двома суміжними значеннями закінчується вільний простір для нових ключів.

Таким чином, проблемою є реалізація методів організації та коректного оновлення поля порядку у впорядкованому списку з погляду продуктивності, точності та зручності реалізації.

Аналіз досліджень та публікацій Проблема підтримки впорядкованого списку (order-maintenance problem) є відомою в теорії структур даних. Вона формалізується як задача підтримки лінійного порядку з операціями вставки, видалення та запитами порівняння порядку.

Наприклад, у статті [1] запропоновано ефективні структури підтримки порядку даних в динамічних структурах XML, які можна використовувати, працюючи із записами у базах даних, адже у БД важливо мінімізувати кількість операцій при виконанні операцій над елементами списку. Авторами було описано використання спеціалізованих міток, що дозволяють уникнути частої оптимізації значень порядку елементів списку навіть при великій кількості операцій. Також, у статті [2] представлені спрощені алгоритми для підтримки порядку у списках, які досягають тих самих теоретичних меж, що й інші популярні рішення, але зі спрощеною реалізацією. Автори також надають експериментальні докази ефективності своїх підходів.

Метою роботи є систематизувати існуючі підходи до реалізації впорядкованих списків та провести їх порівняльний аналіз за ключовими критеріями. Зокрема, розглянути варіанти зберігання порядку (поле в записі проти структурованих зв'язків), поведінку при додаванні, переміщенні та видаленні елементів, вплив обраного способу на продуктивність та споживання пам'яті, особливості точності представлення порядку (наприклад, проблеми даних формату IEEE-754) та необхідність нормалізації значень порядку.

Виклад основного матеріалу. Існує низка можливих підходів до реалізації впорядкованих структур, кожен з яких має свої переваги та недоліки залежно від контексту використання. На практиці застосовують як структури на основі посилань між елементами (включаючи прямі або двобічні зв'язки), так і підходи із використанням числових значень порядку сортування. Вибір того чи іншого методу часто залежить від наявних ресурсів системи, частоти потреби у нормалізації значень, та впливає на точність збереження порядку, а також стійкість до масштабування. Нижче наведено детальний порівняльний аналіз цих методів у типових сценаріях змін структури списку.

До популярних підходів реалізації впорядкованих списків відносяться використання поля порядку сортування або зв'язних списків.

Використання поля порядку є найпростішим і найпоширенішим підходом збереження впорядкованості елементів у реляційних базах даних. Даний підхід передбачає додавання в таблицю колонки, що визначає позицію кожного запису при сортуванні. Зазвичай такій колонці надають ім'я *«sort_index»* або *«order_index»*. Значенням поля індексу сортування рядка таблиці також називають ключем сортування, індексом упорядкування тощо.

Значення даної колонки (поля) залежить від вимог до програмного забезпечення, потужностей системи, на якій розгорнуте ПЗ, та від персональних уподобань розробників. Зазвичай для значення індексу сортування використовують цілочисельні, дробові або рядкові (текстові) ключі.

У випадку використання підходу з цілочисельними значеннями у колонці сортування елементів використовуються послідовні цілі числа (наприклад, 1, 2, 3, …). До переваг такого підходу відносяться легкість в реалізації, точність, інтуїтивність та очевидність, оскільки такі значення легко зрозуміти в процесі дебагінгу (під час розробки програмного забезпечення) або ручного виставлення ключів. До суттєвих недоліків даного підходу належить відсутність гнучкості для вставки елементів – кожна вставка нового елементу не в кінці списку потребує зсуву великої кількості індексів сортування інших елементів, за рахунок чого дуже страждає швидкодія системи. Прикладом використання даного методу є статичні списки, або списки, де операція вставки не є частим випадком, наприклад – таблиці лідерів.

Використання підходу розрідженого цілочисельного підходу використовується для того, щоб полегшити вставку нових елементів, часто залишають пусті простори. Наприклад, записам можуть бути присвоєні значення «100», «200», «300» і так далі. Це дозволяє вставляти нові елементи між існуючими, привласнюючи їм значення середнього арифметичного ключа нових «сусідів»: «150», «250» тощо, за рахунок чого цей підхід являється набагато продуктивнішим за підхід послідовних цілочисельних індексів. Також, дане рішення являється безпечнішим у випадку спроби вставки елементів кількома користувачами одночасно. До недоліків можна віднести значення індексів сортування менш читабельними та все ще наявну (хоч і нерегулярну) необхідність нормалізації ключів сортування, оскільки все ще можлива відсутність вільних цілочисельних значень між двома індексами елементів. *Нормалізація* – це процес переприсвоєння індексів (що потребує оновлення

багатьох рядків). У списку систем, де використовується даний підхід є такі популярний додаток для продуктивності Trello [3].

Слід зазначити, що у більшості систем явний порядковий номер не є необхідним, а у випадках, де він потрібен – його можна неявно сформувати прямо в інтерфейсі, то недолік неінтуїтивного представлення ключа не є суттєвим.

Підхід з використанням значень з плаваючою комою використовують значення типу *«float»* або *«double»* для більш точної вставки. Наприклад, якщо є елемент з індексом «1.0» і елемент з індексом «2.0», можна вставити новий елемент з індексом «1.5». Це дозволяє легше керувати порядком, змінити або взагалі позбутися процесу нормалізації ключів сортування, хоча теж не без обмежень: використання сучасними мовами програмування даних з плаваючою комою за стандартом «64-bit IEEE-754 float» характеризується частими проблемами з точністю та арифметичними операціями [4], зокрема з операціями порівняння та ділення, які є ключовими у процесі маніпуляції ключами порядку елементів довільних списків. Даний тип ключа упорядкування використовується у сучасних системах, у яких є типовим випадок спільного доступу до редагування довільних списків.

Використання лексикографічного підходу з текстовими ключами упорядкування набуло популярності за рахунок можливості умовно-безкінечної генерації нових ключів між існуючими (обмеженням стає лише фізична пам'ять хоста бази даних, де вона розгорнута, рідше – обмеження розміру текстового поля даних). При використанні даного підходу не виникають проблеми паралельної вставки та немає недоліків у точності, на відміну від числових значень. Проте, реалізація даного підходу є складнішою, у порівнянні з іншими підходами, також порівняння рядків є більш ресурсозатратним процесом. Даний метод часто використовується різним програмним забезпеченням для реалізації операції функціоналу відміни або повтору.

У таблиці 1 наведено порівняльну характеристику усіх згаданих підходів з використанням індексу упорядкування за основними критеріями.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика підходів з використанням індексу сортування

Тип індексу порядку	Швидкодія операції вставки	Точність	Чи потребує нормалізації з часом
Послідовні цілочисельні значення	Повільна	Висока	Так
Розріджені цілочисельні значення	Середня	Висока	Так (рідко)
Значення з плаваючою комою	Швидка	Середня	Так (у випадку дрейфу плаваючої коми)
Текстові значення	Швидка	Висока	Ні

Інша методологія зберігання порядку передбачає використання посилань з одного елементу на сусідні. Наприклад, кожен запис може мати поле «prev_id» (та, в разі двозв'язного списку, ще «next_id»), що вказує на сусідні елементи. У такій реалізації елементи фізично зв'язані, й зміна порядку здійснюється перепризначенням цих посилань. Наприклад, у однозв'язному списку при вставці нового елемента на певну позицію достатньо змінити «next_id» попереднього вузла. Підхід дозволяє легко додавати і видаляти окремі елементи (достатньо кількох операцій оновлення полів) без зміни інших. У випадку використання реляційних баз даних, надійність порядку може бути забезпеченою створенням прямих зв'язків між елементами. Проте для одержання всього списку в правильному порядку потрібне або багаторядкове з'єднання *JOIN* або використання рекурсивного запиту (*Common Table Expression*) до таблиці. У випадку використання СКБД PostgreSQL можна використати функціонал спеціалізованого поля індексу рівня [5]. Існує й другий недолік: якщо елемент одночасно повинен належати до декількох впорядкованих представлень (наприклад, завдання належать до різних категорій або проектів), потрібно мати окремі зв'язки для кожної з цих «систем». У такому випадку зазвичай використовують допоміжні таблиці для зв'язку «список – елемент» з полями порядку в цьому списку. Прикладом може бути таблиця «category_member» (із колонками «category_id», «task_id», «order_index»), де «order_index» задає позицію завдання у категорії. Найсуттєвіший недолік даного підходу виражається тоді, коли є потреба створення функціоналу фільтрування елементів списку – у цьому випадку використання даного методу не є доцільним, адже не можливо передбачити усі можливі комбінації результатів пошуку з фільтрами.

Отже, зв'язні списки (або таблиці зв'язків) зручно використовувати, якщо потрібна часта локальна реорганізація (переміщення блоків елементів) і можна виконати рекурсивний обхід за цими посиланнями, але їх використання є обмеженим в залежності від функціоналу ПЗ. Водночас, використання даного підходу унеможливлює швидке виведення упорядкованих даних без додаткових обчислень.

Наведені методології можна детально порівняти за критеріями маніпуляції даних, збереження даних у БД, витрати фізичної пам'яті на збереження даних та точність. Нижче наведено розгорнуте порівняння за даними критеріями.

Додавання і переміщення елементів: при використанні ключа сортування, для вставки на початок чи кінець списку досить привласнити новому елементу відповідно мінімальне або максимальне значення (наприклад, будь-чи дуже велике число), не змінюючи інших рядків. Для вставки всередину потрібно обрати значення між двома сусідніми ключами. Якщо це можливо (наприклад, маємо ключі «100» і «200», тоді беремо новий ключ «150»), то оновлення торкнеться лише нового рядка. При переміщенні окремих елементів достатньо оновити значення «sort_index» (іноді – декілька, якщо змінюється відносний порядок сусідів). У випадку зв'язних списків переміщення елемента (або навіть групи сумжних елементів) виконується зміненням кількох покажчиків. Наприклад, при переміщенні одного елемента в іншу позицію у однозв'язному списку оновлюються поля «next_id» попередника нового місця та попередника старого місця. Такий підхід, хоч і вимагає кількох операцій оновлення даних, проте, у загальному є простішим, ніж оновлення великої кількості полів sort_index. Однак при використанні зв'язних списків слід бути обережним з пустими (пропущеними) посиланнями і забезпечувати цілісність зв'язків (фіксуючи транзакцією оновлення двох сумжних записів або використовуючи обмеження зовнішніх ключів). З огляду на продуктивність, реляційні СКБД більш оптимізовані для маніпуляцій даними за числовим полем, ніж під довгі ланцюжки з'єднань, тому при великій кількості елементів запит на всі записи у правильному порядку може бути помітно повільнішим при використанні методології зв'язків без допоміжного сортувального поля.

Видалення елементів: у підході з полем сортування видалення будь-якого елемента не вимагає зміни інших – достатньо виконати операцію видалення. Навіть якщо між значеннями утворюються пропуски (наприклад, після видалення елементу з порядком «2» - лишаються елементи з ключами «1» і «3»), це не впливає на результат, оскільки сортування за полем «sort_index» все одно поверне список із правильним порядком. В окремих реалізаціях може застосовуватися періодична *нормалізація* – перезапис індексів спочатку (1, 2, 3, ...) для зручності користувача, але не рядове опція для читабельності. У зв'язних списках видалення також доволі легке: потрібно переадресувати вказівники сусідніх вузлів так, щоб видалений елемент був вилучений з ланцюга. Зазвичай це потребує оновлення не більше двох записів («next_id» попереднього та, у двозв'язному списку, «prev_id» наступного елемента). Фактично в обох підходах видалення виконується швидко і не вимагає корекцій усього набору даних.

Фізичне збереження даних у базі та витрати пам'яті: при зберіганні поля порядку як атрибута таблиці кожен рядок БД містить одне числове (чи рядкове) значення. Цей метод є компактним: додаткова пам'ять витрачається лише на одне поле числового або текстового на запис у таблиці. На відміну від цього, зв'язний список передбачає зберігання посилань (принаймні одного «next_id», іноді – ще й «prev_id»), і якщо ці посилання реалізовані як цілі числа (зовнішній ключ), то для кожного елемента додається 4–8 байт на зберігання ідентифікаторів сумжних елементів. Таким чином, зв'язний список майже вдвічі «важчий» за таблицю з одним полем індексу. За критерієм швидкості вибірки впорядкованих даних використання цифрового індексу порядку зазвичай є ефективнішим підходом: СКБД може застосовувати індекси на основі бінарного дерева або зовнішнє сортування на цьому полі. У випадку використання зв'язків доводиться застосовувати рекурсію або декілька поєднань, що при великій глибині списку може призводити до повільної вибірки.

Точність представлення: якщо для поля порядку використовується тип з плавакочою комою (*«float»* або *«double»*), слід враховувати обмеження точності стандарту IEEE-754. Наприклад, між числами 1.0 і 2.0 існує скінченне число представлень *«double»*, якщо послідовно вставляти елементи між сусідніми позиціями, може настати момент, коли жодне нове число не впишеться між двома існуючими через втрату розрядності. Як показує практика, для вставок (де нове значення встановлюється у процесі вставки) *«double»* дозволяє виконати близько 50–100 послідовних вставок, перш ніж дробову частину доведеться нормалізувати. Альтернативою є використання

числового типу «*DECIMAL*» із достатньою точністю або власних алгоритмів з мітками, як-от дробові мітки на *дереві Stern-Brocot* [6]. У будь-якому разі, обраний метод має передбачати періодичну нормалізацію: коли між значеннями ключа «sort_index» вже неможливо вставити нове, доводиться перераховувати всі позиції в базі (наприклад, зробити всім записам порядкові номери 1…N, з кроком 1). При збереженні поля цілого типу така нормалізація зазвичай проводиться тоді, коли кроки між сусідніми значеннями стали однаковими та замалими для подальших вставок. При зв'язному підході нормалізація не застосовується: адже зв'язки не мають фіксованого кроку, завжди можна під'єднати новий вузол, змінивши вказівники.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, у статті проаналізовано дві основні методології зберігання та оновлення впорядкованих списків: поле сортування з числовим або рядковим індексом, зв'язні структури (список або таблиця зв'язків). При використанні методології з полем сортування можливий вибір між типами ключів упорядкування. Кожний метод має свої плюси і мінуси. Використання числових типів є простим і зручним для вибірки через звичайний SQL-запит, але потребує періодичної нормалізації та врахування обмежень точності. Використання рядкового (текстового) ключа виключає часту потребу у нормалізації, але, у порівнянні, є дещо повільнішим, за рахунок особливостей порівняння значень у системах керування базами даних. Зв'язні списки дозволяють значно полегшити виконання операцій вставки й переміщення у простіших системах, проте ускладнюють пряму вибірку впорядкованих даних і додають накладні витрати на зберігання покажчиків. Практичний висновок полягає в тому, що для більшості завдань (списки завдань, прості черги) достатньо поля сортування з періодичною нормалізацією або розширеними кроками.

Перспективним напрямом подальшого дослідження є розгляд конкурентних сценаріїв роботи системи, коли декілька користувачів одночасно змінюють порядок. Тут можливі конфлікти оновлення (наприклад, двоє користувачів намагаються вставити елементи між одними й тими самими сусідами). Потенційними рішеннями можуть бути механізми оптимістичної локалізації оновлень (наприклад, системи контролю версій) або застосування CRDT/OT-підходів для списків (як це робиться у спільних редакторах). Також можна дослідити автоматизовані стратегії нормалізації, які запускаються при певних умовах (наприклад, коли сусідні ключі стають однаковими або дуже близькими).

Список бібліографічного опису

1. A. Silberstein et al. Efficient Maintenance of Order-Based Labeling for Dynamic XML Data. *International Conference on Data Engineering.* 2005. P. 285–296.
2. Bender, M. A., Cole, R., Demaine, E. D., Farach-Colton, M., & Zito, J. Two Simplified Algorithms for Maintaining Order in a List. *European Symposium on Algorithms*. 2002. Vol. 2461. P. 152–164.
3. The Trello tech stack. Atlassian. URL: [illegible] (дата звернення: 10.04.2025).
4. Floating-Point Arithmetic: Issues and Limitations. URL: [illegible] (дата звернення: 12.04.2025).
5. PostgreSQL: CREATE INDEX. URL: [illegible] (дата звернення: 02.05.2025).
6. The Stern-Brocot Tree and Farey Sequences. URL: [illegible] (дата звернення: 03.05.2025).

References

1. A. Silberstein et al. Efficient Maintenance of Order-Based Labeling for Dynamic XML Data. *International Conference on Data Engineering.* 2005. P. 285–296.
2. Bender, M. A., Cole, R., Demaine, E. D., Farach-Colton, M., & Zito, J. Two Simplified Algorithms for Maintaining Order in a List. *European Symposium on Algorithms*. 2002. Vol. 2461. P. 152–164.
3. The Trello tech stack. Atlassian. URL: [illegible] (date of access: 10.04.2025).
4. Floating-Point Arithmetic: Issues and Limitations. URL: [illegible] (date of access: 12.04.2025).
5. PostgreSQL: CREATE INDEX. URL: [illegible] (date of access: 02.05.2025).
6. The Stern-Brocot Tree and Farey Sequences. URL: [illegible] (date of access: 03.05.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-20
УДК: 004.415
Краснокутська Інесса Володимирівна, к. ф.-м.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-7034-7291
Дутчак Ольга Олексіївна, студентка
https://orcid.org/0009-0006-2941-8648
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ ТЕСТУВАННЯ САЙТУ ФАКУЛЬТЕТУ З ВИКОРИСТАННЯМ CYPRESS JS ТА ІНТЕГРУВАННЯ BDD ФРЕЙМВОРКУ CUCUMBER

Краснокутська І. В., Дутчак О. О. Автоматизоване тестування сайту факультету з використанням Cypress JS та інтегрування BDD фреймворку Cucumber. У статті розглянуто методологію Behavior Driven Development (BDD) в контексті наскрізного тестування веб-додатків за допомогою фреймворку Cypress. Описано суть цієї методології, а також основні переваги її застосування при автоматизації тестування. Зокрема, підкреслюється як інтеграція Cypress з BDD дозволяє створювати тести, що відображають реальні користувацькі сценарії, використовуючи природну мову. Особливу увагу приділено використанню Cucumber, який забезпечує можливість написання тестових сценаріїв у форматі Gherkin. Ці підходи покращують співпрацю між розробниками, тестувальниками та бізнес-стейкхолдерами, оскільки всі учасники процесу можуть легко розуміти вимоги та сценарії тестування, написані простою й доступною мовою. У статті також обґрунтовано, чому використання Cypress у поєднанні з BDD забезпечує високу ефективність тестування веб-додатків, зменшення кількості помилок і підвищення якості кінцевого продукту.
Ключові слова: автоматизація тестування, E2E тести, Cypress, BDD, Cucumber, Gherkin

Krasnokutska I., Dutchak O. Automated Testing of a Faculty Website Using Cypress JS and Integration with the BDD Framework Cucumber. The article explores the methodology of Behavior Driven Development (BDD) in the context of end-to-end testing of web applications using the Cypress framework. It discusses the essence of this methodology and the key advantages of its application in test automation. In particular, the article highlights how the integration of Cypress with BDD allows the creation of tests that reflect real user scenarios using natural language. Special attention is given to the use of Cucumber, which enables writing test scenarios in the Gherkin format. This significantly improves communication between developers, testers, and business stakeholders, as it ensures a shared understanding of requirements and test scenarios written in a language that is clear to everyone. The article also justifies why the use of Cypress in combination with BDD ensures high testing efficiency for web applications, reducing the risk of errors and improving the quality of the final product.
Keywords: automated testing, E2E tests, Cypress, BDD, Cucumber, Gherkin

Постановка наукової проблеми. У сучасному програмному забезпеченні важливим аспектом є забезпечення його стабільності, функціональності та відповідності очікуванням користувачів. Збільшення складності програмних продуктів, а також швидкість змін у вимогах та технологіях потребують від розробників більш ефективних підходів до тестування. Автоматизоване тестування є потужним інструментом для зменшення ризиків помилок, покращення якості продукту та прискорення процесу розробки. Воно дозволяє не тільки автоматизувати повторювані перевірки, але й значно знизити ймовірність людських помилок, що виникають під час тестування вручну.

Одним із найефективніших підходів до перевірки роботи веб-додатків є наскрізне (E2E) тестування, яке забезпечує перевірку всієї системи в умовах, максимально наближених до реальних сценаріїв використання. Це тестування дозволяє виявити не тільки локальні помилки в коді, але й проблеми взаємодії різних компонентів системи, що є важливим аспектом для веб-додатків, які часто мають складну архітектуру та безліч залежностей між мікросервісами, базами даних та іншими зовнішніми системами. Застосування E2E тестування дає змогу розробникам і тестувальникам виявляти і виправляти помилки на ранніх етапах розробки, що в кінцевому результаті підвищує стабільність і якість кінцевого продукту.

Проте попри поширення E2E тестування на практиці, існує відносно небагато наукових досліджень і публікацій, що висвітлюють особливості застосування сучасних інструментів для такого тестування, зокрема у контексті інтеграції засобів типу Cypress із підходами, орієнтованими на поведінку (BDD), такими як Cucumber. Це створює потребу в детальному аналізі ефективності подібних рішень та розробці практичних рекомендацій щодо їх застосування. Саме це і визначає актуальність дослідження, спрямованого на вивчення можливостей наскрізного тестування з використанням сучасних інструментів в умовах реального проєктування веб-застосунків.

Аналіз досліджень. У наукових статтях спостерігається достатній інтерес до автоматизованого E2E-тестування як ключового підходу до перевірки складних веб-додатків. Дослідники відзначають, що на відміну від модульного чи інтеграційного тестування, E2E дозволяє охопити всю систему цілісно, перевіряючи роботу компонентів у реальному середовищі [1, 2, 6].

Серед популярних інструментів особливу увагу привертає Cypress, який завдяки зручному API, високій продуктивності та можливостям візуалізації тестів отримав широке визнання в спільноті. Важливою перевагою Cypress є підтримка інтеграції з підходом Behavior Driven Development (BDD), що забезпечує написання тестів у форматі Gherkin — мовою, зрозумілою як технічним, так і нетехнічним фахівцям. Така інтеграція, зокрема за допомогою Cucumber, сприяє кращій комунікації в командах і підвищує прозорість процесу тестування [3, 4, 5]. Доцільною підкреслюється доцільність використання E2E-тестування в рамках CI/CD-процесів, де воно дозволяє швидко виявляти регреси та знижувати ризики на ранніх етапах розробки [7].

Невирішені аспекти проблеми. Попри значну увагу до автоматизованого E2E-тестування, недостатньо дослідженим залишається питання формалізації та оптимізації структури тестів у межах Cypress з урахуванням принципів повторного використання коду, масштабованості та зручності супроводу. Особливо актуальним є впровадження підходу Page Object Model у поєднанні з BDD, що дозволяє підвищити ефективність написання й підтримки E2E-тестів.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є аналіз та реалізація практичної моделі організації E2E-тестів у середовищі Cypress із використанням Page Object Model та підходу BDD з акцентом на структурованість, повторне використання компонентів та покращення комунікації між розробниками й аналітиками.

Основна частина. Швидкий прогрес технологій став ключовим фактором у розвитку сучасного сайту, особливо в галузі веб-розробки. Інтернет, що колись слугував лише джерелом інформації, сьогодні є потужною платформою для комунікації, ведення бізнесу та освіти. Тому у цифрову епоху ефективність та функціональність веб-ресурсів вищих навчальних закладів стають дедалі важливішими.

З метою забезпечення високої якості сайту факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (https://fmi.chnu.edu.ua/), важливо здійснювати регулярне тестування. Це забезпечить зручний доступ до важливої інформації для всіх користувачів сайту, включаючи навчальний та адміністративний персонал, а також сприятиме формуванню позитивного іміджу факультету в онлайн-просторі. Крім того, постійний контроль за роботою сайту дозволяє оперативно виявляти та усувати технічні проблеми, що можуть вплинути на користувацький досвід. Регулярне тестування також сприяє удосконаленню ресурсу, дозволяючи впроваджувати нові функції та підвищувати його зручність і ефективність.

Сайт факультету надає широкий набір функцій, зокрема доступ до розкладу занять, навчальних матеріалів, контактів викладацького складу та адміністрації. Також він містить інтегровані засоби комунікації, зокрема електронну пошту та онлайн-платформи. Однак під час користування можуть виникати певні труднощі, такі як повільне завантаження сторінок, некоректні посилання або незручна навігація. Саме тому наскрізне (E2E) тестування відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності та коректної роботи сайту.

Наскрізне або E2E тестування дозволяє перевірити роботу всього додатка від початку до кінця, імітуючи реальні сценарії використання. Це дає змогу не лише виявляти помилки в окремих модулях, а й перевірити коректну взаємодію між різними компонентами системи, що є особливо важливим для сучасних веб-додатків [2].

Основна перевага наскрізного тестування полягає в його здатності перевірити функціональність додатка в умовах, максимально наближених до реального використання. На відміну від модульного тестування, яке зосереджується на окремих частинах коду, наскрізні тести охоплюють весь процес – від взаємодії користувача з інтерфейсом до обробки запитів на сервері. Це допомагає забезпечити стабільність роботи сайту та покращити користувацький досвід (Рис. 1).

Рис. 1. Переваги наскрізного тестування

Одним із найефективніших інструментів для автоматизованого тестування є Cypress. Цей фреймворк є потужною платформою для наскрізного тестування веб-додатків з відкритим кодом, що використовує JavaScript і підтримує операційні системи Windows, Linux і macOS. Його основними перевагами є простота у використанні, швидке виконання тестів і можливість їх перевірки в режимі реального часу, що значно полегшує процес пошуку та виправлення помилок. А завдяки своїй орієнтації на потреби фронтенд-розробників Cypress став одним із найкращих інструментів для тестування. Його можна використовувати навіть у випадках, коли бекенд ще не повністю готовий, що значно спрощує процес розробки та перевірки функціональності.

З метою подальшого підвищення ефективності тестування та оптимізації комунікації між учасниками команди доцільним є впровадження у Cypress фреймворку Cucumber, що реалізує підхід поведінково-орієнтованої розробки (BDD). Cucumber дозволяє створювати тести природною мовою, що робить їх зрозумілими не лише розробникам, а й бізнес-стейкхолдерам. Суть цього підходу ілюструється нижче (Рис. 2).

Рис. 2. Переваги BDD-фреймворку Cucumber

Структура тестового проєкту передбачала використання папки E2E з двома основними підпапками: *steps* для зберігання тестових файлів та *pages* для реалізації локаторів і взаємодії з елементами сторінок (Рис. 3). Ця організація базувалася на принципах шаблону Page Object Model, що спрощувало написання й підтримку тестів, а також сприяло їх масштабованості та повторному використанню [3]. Однак для подальшого вдосконалення процесу автоматизованого тестування було вирішено впровадити фреймворк Cucumber, що дозволило ще більше підвищити ефективність тестування та забезпечити кращу інтеграцію з іншими частинами проєкту.

Рис. 3. Підхід Page Object Model

У процесі побудови автоматизованих тестів, зокрема з використанням фреймворку Cypress, застосовується структурний підхід, що ґрунтується на усталених принципах модульного та поведінково-орієнтованого тестування [4]. Конструкція *describe* використовується для визначення загального контексту тестування, групування тестових сценаріїв за функціональним призначенням та забезпечення логічної організації тестів. Такий підхід сприяє покращенню структурованості коду та підвищує його читабельність.

Блок *beforeEach* виконує ініціалізаційні дії, необхідні для підготовки тестового середовища перед виконанням кожного окремого тесту. Це дозволяє гарантувати сталість початкових умов і запобігти взаємному впливу тестів, що є необхідною умовою для забезпечення достовірності та відтворюваності результатів.

Конструкція *it* застосовується для опису конкретних тестових випадків, кожен з яких

перевірює окремий аспект поведінки системи. Така деталізація дозволяє локалізовано тестувати функціональність, спрощує аналіз результатів і полегшує подальшу підтримку тестової бази. Загалом, така структура відповідає принципам логічної ієрархії, що є характерною рисою якісно побудованих E2E тестів.

Із впровадженням підходу Behavior Driven Development (BDD) та інтеграцією фреймворку Cucumber з Cypress, структура тестового проєкту зазнала розширення за формалізації. Вона доповнилась спеціалізованими папками, такими як *features* та *step definitions*, що дозволило реалізувати тестування у формі природномовних сценаріїв, які легше інтерпретуються всіма учасниками розробки. У папці *features* зберігаються файли тестових сценаріїв, описаних за допомогою мови Gherkin. Мова Gherkin дозволяє сформулювати тести в природній мові, що робить їх зрозумілими не лише для розробників, але й для інших учасників проєкту, таких як менеджери або тестувальники. Файли, що містяться у цій папці, включають опис тестових сценаріїв, які моделюють очікувану поведінку системи в типових користувацьких ситуаціях, як наприклад, проілюстровано на рис. 4.

Рис. 4. Сценарій наявний поля пошуку

У папці *steps* розміщуються відповідні файли з реалізацією кроків, що відповідають сценаріям, описаним у форматі Gherkin. Такий підхід забезпечує чітке розмежування між формальним описом поведінки системи та її технічною реалізацією, що сприяє покращенню супроводжуваності та масштабованості тестів. Кожен крок описується у вигляді окремої функції, яка виконує конкретну дію або перевірку відповідно до логіки тестового сценарію (Рис. 5).

Рис. 5. Реалізація кроків сценарію

Умови прийняття тесту детально описані в таблиці нижче (Таб.1). У ній наведено всі критерії, яким має відповідати тест для успішного проходження.

Таблиця 1. Критерії прийняття

Крок	Очікуваний результат	Фактичний результат	Статус
Натискання на кнопку пошуку, коли рет	Поле пошуку стає видимим	Поле пошуку стало видимим	Успішно
Введення "Невідомий текст" у поле пошуку	Текст "Невідомий текст" введено у поле пошуку	Текст успішно введено	Успішно

Перевірка URL після введення запиту	URL містить https://fmi.chnu.edu.ua/pnbuk/?query=	URL містить очікуваний параметр	Успішно
Перевірка відображення повідомлення про відсутність результатів	Відображається текст "Нічого не знайдено"	Текст успішно відображається	Успішно

У процесі дослідження було здійснено всебічне тестування веб-сайту факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, що дозволило оцінити стабільність його функціонування, виявити потенційні проблеми та запропонувати шляхи їх усунення. Для цього використовувалася методологія наскрізного (E2E) тестування, що є одним із найбільш ефективних підходів до автоматизованої перевірки веб-додатків. Основним інструментом тестування став Cypress, який забезпечує швидке виконання тестів у реальних умовах браузерного середовища та дозволяє ефективно взаємодіяти з елементами сторінки.

В ході тестування було створено структуру тестового проекту, що базується на принципах Page Object Model. Це дало змогу підвищити організованість тестового коду, зменшити його дублювання та спростити подальше супроводження. В рамках цієї архітектури у папці E2E було створено дві основні директорії: *tests* для зберігання тестових сценаріїв та *pages* для управління локаторами та методами взаємодії з елементами веб-сторінок. Завдяки такому підходу тести стали більш структурованими, що сприяло їх зручності та повторному використанню.

Крім традиційного E2E тестування, у проекті також було реалізовано методологію Behavior Driven Development (BDD) [5] з використанням Cucumber [6]. Цей підхід дозволив писати тестові сценарії у форматі Gherkin, що зробило їх більш зрозумілими навіть для тих учасників команди, які не мають глибоких технічних знань. У структурі тестового середовища було створено окрему папку *features*, що містить файли сценаріїв у форматі *.feature*, де тести описуються у вигляді читабельних поведінкових сценаріїв, використовуючи ключові слова Given, When, Then. Для реалізації відповідних кроків тесту була створена папка *step definitions*, де кожен сценарій отримав свою логічну реалізацію за рівнем коду. Реалізацію всієї тестової інфраструктури можна переглянути у GitHub-репозиторії https://github.com/bohdanchuk/fmi-cypress.

Тестування надало можливість оцінити функціональні можливості сайту та рівень зручності його використання для кінцевих користувачів. У процесі перевірки було проаналізовано ефективність навігації, доступність ключової інформації та логіку структури веб ресурсу. Особлива увага приділялася роботі пошукової системи, виконання пошукових запитів дозволило переконатися в її працездатності, а також у відповідності отриманих результатів заданим ключовим словам. Такий підхід забезпечив комплексне уявлення про якість реалізованих механізмів та їхню відповідність очікуванням користувача. За підсумками тестування сформовано базу для подальшого аналізу й удосконалення функціоналу сайту з метою підвищення загального рівня зручності та ефективності користування.

Важливо зазначити, що автоматизоване тестування є безперервним процесом, оскільки усунення одних помилок може призвести до появи інших. Регулярне тестування дозволяє мінімізувати ризики виникнення критичних збоїв та забезпечує стабільність роботи веб-додатків у довгостроковій перспективі. Успішна інтеграція BDD у тестове середовище значно підвищує ефективність командної роботи, оскільки тестові сценарії можуть створюватися та аналізуватися не лише тестувальниками, а й аналітиками та розробниками.

Завдяки комплексному підходу, що поєднує традиційне E2E тестування та методологію BDD, було отримано цілісну картину роботи сайту, що сприяє його подальшій оптимізації та вдосконаленню.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було реалізовано прикладну модель організації наскрізного (E2E) тестування з використанням фреймворку Cypress, архітектурного підходу Page Object Model та методології Behavior Driven Development (BDD) у поєднанні з Cucumber. Запропонований підхід дозволив створити структуровану, читабельну та ефективну систему тестування, що забезпечує зручність підтримки, повторне використання коду та зрозуміле

формулювання тестових сценаріїв. Тестування веб-сайту факультету математики та інформатики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича показало його стабільну роботу, відповідність функціональних можливостей очікуванням користувачів та дотримання сучасних стандартів якості інтерфейсу.

Використання мови Gherkin для опису поведінки системи у формі, близькій до звичайної мови має перспективу значно спростити комунікацію між членами команди, зокрема у міждисциплінарних колективах, де технічні та нетехнічні фахівці спільно формулюють вимоги до функціональності. Інтеграція Gherkin-сценаріїв разом з програмною реалізацією через Cucumber створює передумови для досягнення більшої узгодженості між очікуваною та фактичною поведінкою системи, що у майбутньому може сприяти підвищенню прозорості розробки та кращому взаєморозумінню в команді.

У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на таких напрямах, як розширення масштабованості тестових проєктів, інтеграція E2E тестів у CI/CD пайплайни [7] для забезпечення безперервної перевірки якості, а також застосування візуального тестування й автоматизованого аналізу продуктивності. Перспективним є також вивчення можливостей використання штучного інтелекту та машинного навчання для динамічної генерації тестів, адаптивного виявлення нових сценаріїв використання та підвищення ефективності виявлення дефектів. Крім того, подальше дослідження методів тестування доступності (accessibility testing) може посилити інклюзивність веб-продуктів і розширити їх аудиторію.

Таким чином, впроваджений підхід демонструє практичну ефективність і створює надійне підґрунтя для подальших розробок у сфері автоматизованого тестування сучасних веб-застосунків.

Список бібліографічного опису:

1. Jeslaja J., Ansar S. Modern Web Automation with Cypress.Io // Open International Journal of Informatics (OIJI). – 2022. – Vol. 10, No. 2. – Published: 15.12.2022. – DOI: https://doi.org/10.11113/oiji2022.10n2.229
2. Maurizio Leotta, Diego Clerissi, Filippo Ricca, and Paolo Tonella. (2016) "Approaches and Tools for Automated End-to End Web Testing", Advances in Computers 101 (2016), 193-237. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065245815000698
3. I. V. Krasnokutska and O. S. Krasnokutskyi. (2024) "Implementing E2E tests with Cypress and Page Object Model: evolution of approaches." CEUR Workshop Proceedings, vol. 3662, 101-110, Retrieved from: https://ceur-ws.org/Vol-3662/paper24.pdf
4. "Cypress Documentation." Cypress.io. Retrieved from: https://docs.cypress.io/
5. Farooq M. S., Omer U., Ramzan A., Rasheed M. A., Atal Z. Behavior Driven Development: A Systematic Literature Review // IEEE Access. – 2019. – Vol. 11. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3302356
6. Pasek M., Radzik A., Kozieł G. Comparative analysis of solutions used in Automated Testing of Internet Applications // Journal of Computer Sciences Institute. – 2021. – Vol. 18. – P. 7–14. – DOI: https://doi.org/10.35784/jcsi.2373
7. Kulkarni N. Automated testing as part of CI/CD pipeline – shift left implementation. // North American Journal of Engineering Research. – 2020. – Vol. 1, No. 3. – URL: https://najer.org/najer/article/view/62.

References:

1. Jeslaja J., Ansar S. Modern Web Automation with Cypress.Io // Open International Journal of Informatics (OIJI). – 2022. – Vol. 10, No. 2. – Published: 15.12.2022. – DOI: https://doi.org/10.11113/oiji2022.10n2.229
2. Maurizio Leotta, Diego Clerissi, Filippo Ricca, and Paolo Tonella. (2016) "Approaches and Tools for Automated End-to End Web Testing", Advances in Computers 101 (2016), 193-237. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065245815000698
3. I. V. Krasnokutska and O. S. Krasnokutskyi. (2024) "Implementing E2E tests with Cypress and Page Object Model: evolution of approaches." CEUR Workshop Proceedings, vol. 3662, 101-110, Retrieved from: https://ceur-ws.org/Vol-3662/paper24.pdf
4. "Cypress Documentation." Cypress.io. Retrieved from: https://docs.cypress.io/
5. Farooq M. S., Omer U., Ramzan A., Rasheed M. A., Atal Z. Behavior Driven Development: A Systematic Literature Review // IEEE Access. – 2019. – Vol. 11. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3302356
6. Pasek M., Radzik A., Kozieł G. Comparative analysis of solutions used in Automated Testing of Internet Applications // Journal of Computer Sciences Institute. – 2021. – Vol. 18. – P. 7–14. – DOI: https://doi.org/10.35784/jcsi.2373
7. Kulkarni N. Automated testing as part of CI/CD pipeline – shift left implementation. // North American Journal of Engineering Research. – 2020. – Vol. 1, No. 3. – URL: https://najer.org/najer/article/view/62.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-21
УДК 004.42
Круглик Андрій Сергійович, аспірант
Мороз Дмитро Максимович, доктор філософії
https://orcid.org/0000-0003-2577-3152
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ В ОБЛАСТІ ОБРОБКИ ПОВІДОМЛЕНЬ. БРОКЕРИ ПОВІДОМЛЕНЬ APACHE KAFKA ТА RABBIT MQ.

Круглик А. С., Мороз Д. М. Аналіз існуючих програмних рішень в області обробки повідомлень. Брокери повідомлень Apache Kafka та Rabbit MQ. У даній статті розглянуто можливості брокерів повідомлень Apache Kafka та Rabbit MQ до обробки повідомлень. Розглянуто не лише можливості кожного з цих брокерів як окремої, безпосередньої обробки повідомлень, але також інші можливості даного виду програмного забезпечення, його проміжкового призначення, відмовості й архітектурних підходів до побудови вказаних брокерів. Такий аналіз дозволяє виділити переваги та недоліки кожного з архітектурних підходів. Серед іншого, було також розглянуто можливості брокерів до масштабування, алгоритмів, способів шифрування трафіку. Розглянуто можливості кожного з брокерів щодо обробки виключних ситуацій. Адже в умовах сучасних як то хмарні фактори виникають зовсім нові вимоги, що пред'являються до побудови сучасного програмного забезпечення. Проведений аналіз дозволяє архітекторам та розробникам програмного забезпечення використати вдалі підходи при розробці нового рішення, а також при вдосконаленні існуючих рішень. Окрім того, в роботі показано практичні використання найбільш розповсюджених можливостей обох брокерів. Це дозволить досвідченим розробникам без зайвої роботи з даними брокерами швидко адаптуватись та приступити до використання даного ПЗ.

Ключові слова: Rabbit MQ, Apache Kafka, брокер повідомлень, черга повідомлень, producer, consumer, binding key, гарантії доставки.

Kruhlyk A., Moroz D. An analysis of existing software solutions in the field of message processing. Apache Kafka and RabbitMQ message brokers. This article examines the capabilities of the Apache Kafka and RabbitMQ message brokers in the context of message processing. The analysis considers not only the basic message handling functionalities of each broker but also explores the broader range of features provided by this category of software. A detailed comparison of the fundamental architectural approaches underlying each broker is presented, highlighting their respective advantages and limitations. Furthermore, the study addresses the brokers' abilities in terms of scalability, integration with external systems, and traffic encryption mechanisms. The brokers' approaches to handling exceptional situations are also examined, recognizing that in the contemporary landscape, such capabilities are increasingly regarded as de facto requirements for the development of modern software systems. The conducted analysis offers valuable insights for software architects and developers, aiding them in selecting effective design strategies for both the creation of new solutions and the enhancement of existing systems. In addition, the paper demonstrates the practical application of the most commonly used features of both brokers. This is intended to assist developers unfamiliar with these technologies in quickly adapting and beginning to work with the software efficiently.

Keywords: Rabbit MQ, Apache Kafka, message broker, message queue, producer, consumer, binding key, delivery guarantees.

Постановка проблеми. У роботах [1, 2] автори описали загальний алгоритм обробки інформаційних потоків повідомлень у системах літальних апаратів. Даний алгоритм базується на математичній моделі обробки інформаційних потоків з урахуванням цінності повідомлення і часу його старіння. Описаний алгоритм дозволяє в найбільш загальному випадку вирішити питання обробки інформаційних потоків. Але в сьогоднішніх реаліях така система не може вважатися повноцінною, тобто цього не достатньо для повного вирішення питання обробки повідомлень. Адже у сучасних умовах до систем обробки повідомлень пред'являються певні вимоги. Це і відмовостійкість, і здатність до відновлення у випадках збоїв, і можливості до масштабування, можливості шифрування трафіку та багато інших. Усі ці вимоги до розробки програмного забезпечення (ПЗ) диктуються умовами сьогодення, тож їх неможливо ігнорувати під час розробки сучасного ПЗ.

В даній роботі автори пропонують проаналізувати такий вид програмних засобів як брокери повідомлень (message brokers). В межах роботи пропонується проаналізувати можливості даного виду програмних засобів. Попередньо, було сформовано список запитань, відповіді на які потрібно отримати при розгляді брокерів повідомлень. Список запитань для аналізу наведено нижче.

– Архітектура брокера повідомлень. Як відрізняються архітектури найбільш популярних брокерів повідомлень. Які способи обробки черг існують.
– Продуктивність та оптимізація. Які існують можливості для масштабування брокерів повідомлень. Які моделі доставки повідомлень існують.

- Які гарантії доставки є у різних брокерів. Як працюють механізми підтвердження повідомлень. Як обробляються ситуації при відмовах. Які стратегії відновлення черг існують при «падінні» брокера.
- Безпека. Які існують механізми авторизації чи автентифікації у брокерах повідомлень. Чи використовуються відомі протоколи шифрування, такі як SSL/TSL у сучасних брокерах повідомлень. Які механізми використовуються для логування подій у брокерах.
- Чи можна інтегрувати брокери повідомлень із зовнішніми технологіями. В першу чергу цікавить питання інтеграції із системами управління базами даних (СУБД), так як повідомлення повинні мати можливість зберігання і накопичення.
- Практичні приклади побудови систем з використанням брокерів повідомлень. Приклади коду на різних мовах програмування, що спростить базові налаштування та використання того чи іншого брокеру в конкретних сценаріях

У підсумку автори розраховують, що такий аналіз дозволить сформувати коректні вимоги до розробки повноцінної системи обробки інформаційних потоків в системах доставки літальними апаратами. Уникнути типових помилок при розробці рішень стосовно того чи іншого аспекту даного виду програмних засобів, та, за можливості, використати найкращі практики до побудови повноцінного ПЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Брокери повідомлень є досить відомим ПЗ, що охоплює достатньо широке коло застосування. З цього випливає, що таке ПЗ є достатньо дослідженим у багатьох сценаріях застосування. Достатньо широка дослідженість даного виду ПЗ дозволяє зробити попередній висновок, що брокери повідомлень широко застосовуються при розробці повноцінних систем як допоміжне ПЗ, і відповідно, існують достатньо документовані приклади використання та способи вирішення тих чи інших проблем.

Серед подібних робіт хотілось би виділити роботу [3], де автор проводить базовий аналіз декількох сучасних фреймворків обробки повідомлень, таких як Apache Kafka, Active MQ Artemis, RabbitMQ, Redis. У роботі наведено порівняльний аналіз цих фреймворків, їхні базові можливості. Розглянуто можливості маршрутизації повідомлень та способи взаємодії між брокером та споживачем. Під способом взаємодії хотілось би акцентувати увагу на підходи, за допомогою яких взаємодіють брокер та споживач, вказана принципова відмінність в цій взаємодії (Pull/Push – based approach). Наведено практичний приклад використання фреймворків у розробці ПЗ для роботи з повідомленнями. Іншим цікавим матеріалом є робота [13], де автор проводить порівняльний аналіз таких брокерів повідомлень як RabbitMQ та Apache Kafka. Розповідає про їх архітектурні відмінності а також сфери можливого застосування. Описує протоколи роботи брокерів та можливості для розширення в загальному виді. Також було проаналізовано роботу [14], де автори приводять практичний кейс до побудови ПЗ з використанням RabbitMQ брокера повідомлень. Приклади коду на мові програмування C# дають можливість інженерам ПЗ оцінити загальний принцип побудови мікросервісної архітектури, де у якості зв'язку буде використовуватись допоміжний програмний засіб – брокер повідомлень.

Постановка завдання. Аналіз існуючих найбільш популярних брокерів повідомлень для оцінки сучасного етапу програмних засобів обробки черг повідомлень, їх можливостей, обмежень, розповсюджених сфер та практик використання

Викладення основного матеріалу дослідження. В загальному вигляді брокер повідомлень, це програма-посередник, що забезпечує комунікацію між окремими сервісами, модулями, системами. Брокер повідомлень являє собою тип побудови архітектури ПЗ, при якому елементи системи «спілкуються» одна з одною за допомогою посередника – брокера повідомлень. Брокер повідомлень перекладає повідомлення з формального протоколу обміну повідомленнями відправника на формальний протокол обміну повідомленнями одержувача. Таким чином, окремі сервіси, служби, модулі чи системи можуть комунікувати між собою навіть якщо вони реалізовані на різних платформах чи написані на різних мовах[3, 4]. Брокери повідомлень використовують для передачі, зберігання, перевірки та доставки повідомлень. Основна задача брокера повідомлень бути посередником між взаємозалежними сервісами, завдяки чому досягається відокремленість процесів всередині системи [3]. В роботі будь-якого брокера повідомлень використовуються як мінімум дві обов'язкові сутності: producer – сутність, що надсилає повідомлення, або виробник повідомлень, та consumer – сутність що споживає, або обробляє повідомлення, іншими словами споживач повідомлення.

Як правило, для комунікації між брокером та виробником/споживачем використовується одна з двох наступних моделей.

Point-to-point - при такій моделі комунікації один або декілька відправників комунікують через брокер з одним або декількома споживачами. При цьому така модель взаємодії гарантує, що кожне повідомлення буде надіслано та оброблено лише один раз [5, 6]. Також ця модель гарантує, що повідомлення буде обов'язково оброблене. Навіть якщо споживач не доступний у даний час, повідомлення буде надіслано йому як тільки відновиться зв'язок. Як правило, для обробки повідомлень у цьому випадку використовується черга типу FIFO (first in first out). При такому способі організації черги повідомлення будуть оброблені у тій же послідовності, що були відправлені виробником повідомлень.

Publish-Subscribe - модель комунікації при якій publisher (виробник) публікує повідомлення в тему, а subscriber (підписник, або споживач повідомлення), отримує повідомлення із тих тем, на які він підписаний. У даній моделі декілька виробників можуть відправляти повідомлення в одну й ту ж тему. Те ж саме стосується і підписників: кожне повідомлення, що надійшло в певну тему, буде відправлено усім споживачам, підписаним на дану тему. Дана модель не гарантує, що повідомлення буде доставлене усім підписникам.

Існує дві моделі доставки повідомлень: push based та pull based. Pull based модель доставки повідомлень працює наступним чином: брокер повідомлень очікує на запит від споживача. Тобто, усі повідомлення накопичуються в черзі самого брокера. Push based модель дозволяє брокеру відправити усі повідомлення відразу споживачам. Ці відмінності потрібно обов'язково враховувати при розробці системи, оскільки в останньому випадку потрібно архітектурно передбачити можливість накопичення повідомлень в ПЗ споживача.

Існує декілька типів гарантій доставки повідомлень. At most once – повідомлення може не дійти, але воно не буде продубльовано. At least once – повідомлення обов'язково буде доставлено, але може бути продубльовано. Exactly once – буде доставлено рівно тільки раз.

Одним з найрозповсюдженіших на сьогоднішній день брокерів повідомлень є Apache Kafka [7]. Сам брокер є досить відомим, добре документованим та має широке ком'юніті. Тож встановлення, базові налаштування даного брокера виходять за межі даної роботи. Пропонується розглянути загальний принцип роботи та проаналізувати можливості обробки повідомлень і черг повідомлень за допомогою Apache Kafka.

Apache Kafka є лог-орієнтованим брокером подій (log-based event broker). Це означає що даний брокер зберігає повідомлення на диск комп'ютера. Окрім того, після прочитання повідомлення споживачем, воно відразу не видаляється, а зберігається певний час залежно від налаштувань, за замовчуванням 1 тиждень. Лог-орієнтована архітектура означає, що повідомлення від виробника будуть потрапляти не в чергу, а в певний лог файл, звідки їх можна буде прочитати одним або декількома споживачами в залежності від конфігурації системи. Схема роботи лог-орієнтованої архітектури з декількома виробниками подій та одним споживачем зображена на рис. 1.

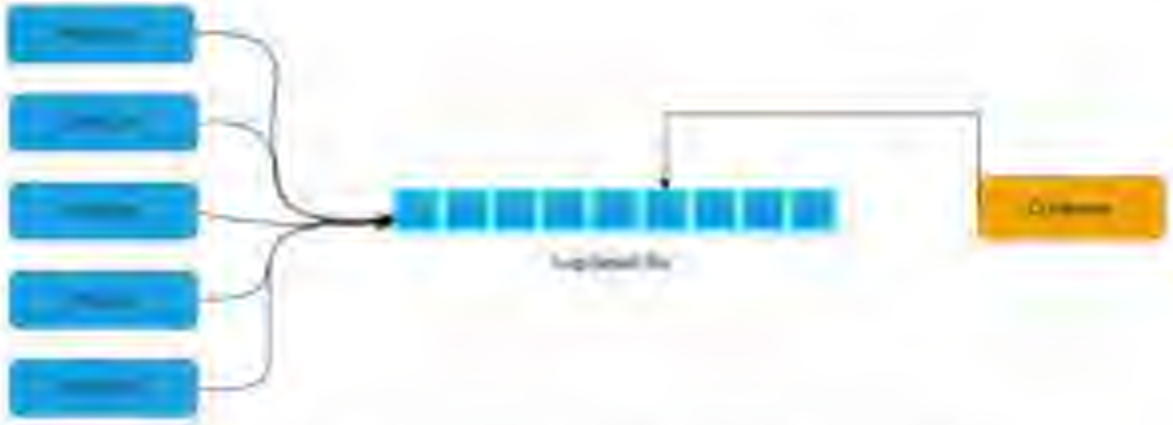


Рис. 1. Лог-орієнтована модель обробки повідомлень

На рис. 1 видно, як декілька виробників додають повідомлення у лог-файл, а споживач по черзі прочитує повідомлення з лог-файлу і обробляє його. Після зчитування повідомлення споживач зміщується у лог-файлі на одну позицію, що дорівнює величині попереднього повідомлення, або офсет. Конструкція здається простою, доки існує лише один споживач. Але даний брокер підтримує дуже велику кількість споживачів і виробників одночасно. Звісно кожне повідомлення може оброблятися різний час. Відповідно, потрібно мати механізм, який забезпечить синхронізацію між різними споживачами, що дозволить уникати повторної обробки раніше обробленого повідомлення. Згідно із роботою [11], для вирішення цього завдання Apache Kafka використовує механізм так званого курсору, який знаходиться безпосередньо всередині брокера повідомлень і дозволяє безпечно зміщуватись в лог-файлі незалежно від швидкості обробки кожного окремого повідомлення.

Як було сказано раніше, логи після їх обробки споживачами не видаляються відразу а певний час зберігаються. Така особливість дозволяє проводити аналіз роботи брокеру, аналіз повідомлень, середній час обробки повідомлення і т. ін. Це у свою чергу дозволить приймати певні рішення стосовно масштабування всієї системи у випадках, коли навантаження є піковим. Серед мінусів такого аналізу виявилось те, що аналіз логів є відносно повільною операцією і більш складною, якщо порівнювати наявність в іншому брокері графічного інтерфейсу для перегляду його роботи в режимі реального часу.

Даний брокер працює за принципом publish-subscribe. Усі споживачі, що будуть обробляти повідомлення, повинні бути підписаними на одну тему (topic). Такий архітектурний підхід дозволяє легко масштабуватись горизонтально через шардінг або партиції. Брокер використовує pull based модель доставки повідомлень.

Згідно з офіційною документацією Kafka підтримує усі три види доставки повідомлень: at most once, at least once, exactly once. Також, Apache Kafka підтримує механізм підтвердження доставки повідомлень. Підтримується як механізм підтверджень доставки повідомлень від виробника брокеру, так і механізм підтверджень доставки від брокера споживачеві. В з'єднанні виробник – брокер, виробник надсилає повідомлення з параметром acks. Даний параметр може мати одне з трьох значень: acks = 0 – виробник не очікує підтвердження доставки, acks = 1 – виробник чекає підтвердження від лідера партиції, acks = all – очікує доки всі репліки підтвердять отримання повідомлення. Стосовно механізму підтвердження отримання та обробки повідомлення споживачем від брокера, Kafka не потребує такого підтвердження, тому що повідомлення не видаляються з лог-файлу після обробки і є можливість обробити його знову. Натомість, Kafka використовує механізм комітів, тобто підтвердження обробки повідомлення і зміни офсету в лог-файлі. Такий механізм працює у двох режимах: автоматичний коміт (auto.commit = true) – брокер автоматично комітить через деякі проміжки часу. Такий механізм простіший у використанні, але може призвести до ситуації, коли повідомлення було отримано споживачем, але не оброблено через виникнення непередбачуваної помилки і «падіння» споживача. В такій ситуації повідомлення фактично не було оброблено. Тож в Kafka існує також механізм ручного коміту (auto.commit = false) – механізм, при якому споживач повинен в ручному режимі підтверджувати отримання повідомлення. Такий механізм може гарантувати, що повідомлення було отримано та оброблено, до виклику коміту і відповідно офсету в лог-файлі.

Брокер має добре продуману стратегію відновлення у випадку «падіння» брокера. Так як в якості черг використовується лог-орієнтований розподілений журнал, черги (топіки) можуть бути легко відновлені завдяки реплікації. Кожна черга має 0 реплік на інших брокерах. Брокери запускаються в наступному порядку – один лідер або ведучий, інші – ведені. Kafka Controller – програмний модуль брокеру, що відповідає за стан брокерів. Тобто саме цей модуль має можливість визначати коли лідер активний і працює. Якщо лідер «падає», Kafka автоматично обирає нового. Окрім того, Kafka використовує не тільки брокер безпосередньо, але також Zookeeper – допоміжне ПЗ яке використовується для координації між брокерами а також відновлення ролей брокерів у випадку «падіння». Тобто, стратегія відновлення наступна: «падає» брокер, Kafka Controller бачить зміну і переобирає лідера. Після цього робота відновлюється. Коли попередній брокер піднімається, відбувається синхронізація лог-файлу і робота продовжується.

Відповідно до документації у вказаного брокера є підтримка автентифікації та авторизації. Для автентифікації використовуються наступні механізми:

- SASL (Simple Authentication and Security Layer).

- SSL (Secure Sockets Layer).
- Kerberos.

Після автентифікації, для визначення дій, які дозволено робити користувачеві, брокер підтримує авторизацію. Для забезпечення цієї функціональності брокер підтримує ACL (Access Control Lists) для обмеження доступу до топіків, груп споживачів та адміністративних команд.

Окрім сказаного вище, Apache Kafka може бути інтегрована із зовнішніми системами такими як СУБД. Для цього брокер використовує Kafka Connect – вбудований механізм для інтеграції із зовнішніми системами, включаючи SQL та NoSQL бази даних. Найбільш популярними конекторами для баз даних є Debezium [9] – який відстежує зміни в реляційних базах даних (БД), та JDBC Connector – що забезпечує роботу читання/запису в SQL бази даних. Це не єдині конектори, що можуть використовуватися в даному брокері, є також спеціалізовані, що працюють лише з певною БД такі як MongoDB Connector та інші.

Рис. 2. Архітектура брокера повідомлень із класичною чергою

Іншим досить відомим брокером повідомлень є RabbitMQ. Він має принципові відмінності від попереднього як за архітектурними характеристиками, так і за більшістю інших показників. Даний брокер використовує класичну чергу повідомлень, де черга зберігається або в оперативній пам'яті комп'ютера, або на диску (залежить від налаштувань). Така архітектура забезпечує зберігання повідомлення лише до того часу, доки повідомлення не було оброблене і, при необхідних налаштуваннях, не було підтвердження обробленим повідомлення. Після цього споживач повідомлення видаляється з черги.

Така конструкція працює за принципом FIFO (first in first out). Тобто повідомлення по черзі забираються з черги, обробляються і видаляються.

На відміну від лог-орієнтованої моделі обробки повідомлень, RabbitMQ не зберігає усі повідомлення. Тож детально проаналізувати інформаційні потоки що надходять, або неодноразово надходили буде складніше. Але, в той же час хотілось би акцентувати увагу на тому, що даний брокер повідомлень має графічний інтерфейс користувача, який, на відміну від логів дозволить у зручному форматі переглядати роботу брокера у режимі реального часу (рис. 3)

Даний брокер також підтримує масштабування. Згідно із матеріалами [12], RabbitMQ можна масштабувати за допомогою маршрутизації. Для цього можна використовувати ключі маршрутизації (routing key). Є декілька видів маршрутизації. Fanout Exchange – повідомлення буде скопійовано до всіх черг що пов'язані з точкою обміну. Direct Exchange - повідомлення відправляється лише у відповідну чергу за умови, якщо binding-ключ такої черги буде рівний ключу маршрутизації повідомлення (routing key). Topic Exchange - При такому типу маршрутизації, binding-ключ черги може задаватись як регулярний вираз. Отже, якщо routing ключ повідомлення покривається регулярним виразом binding-ключа - повідомлення потрапляє у відповідну чергу. Див. приклад рис. 4

Брокер використовує push based модель доставки повідомлень. Коли повідомлення надходить в чергу, брокер відразу шле його споживачеві, якщо останній підключений. Згідно із документацією обсяг повідомлень можна регулювати за допомогою параметру prefetch, щоб вказати скільки повідомлень може бути доставлено одночасно споживачеві. Це необхідно у випадках якщо є навантаження щоб не перевантажити споживача.

Рис. 3. Графічний інтерфейс брокеру повідомлень RabbitMQ

Згідно з офіційними джерелами RabbitMQ із коробки підтримує два види доставки повідомлень: at most once, at least once. Іншим важливим моментом, який згадують автори, є можливість підтвердження доставки повідомлень брокером. RabbitMQ підтримує доставку повідомлень від продюсера брокеру. У цьому випадку виробник буде очікувати підтвердження доставки повідомлення від брокера у вигляді одного з двох типів повідомлень: ack – тобто повідомлення успішно доставлено, або nack – сталася помилка при обробці повідомлення можливостями брокера. Також, RabbitMQ підтримує підтвердження доставки повідомлення від брокера до споживача. У такому випадку, коли споживач обробив повідомлення, він має надіслати ack. Якщо ack не отримано брокером – повідомлення повертається до черги або знищується, залежно від налаштувань [10]. Окрім того, для підтвердження доставки і обробки повідомлень споживачем існує два способи – перший, автоматичне підтвердження (autoAck = true), повідомлення вважається доставленим як тільки воно було отримано споживачем. Автоматичне підтвердження частково спрощує налаштування, але може мати неочікувані наслідки, такі як втрата повідомлення у випадку збою роботи споживача. Другий спосіб підтвердження доставки повідомлення, це ручне підтвердження (autoAck = false). В цьому випадку споживач повинен обов'язково надіслати підтвердження обробки повідомлення.

Відповідно до документації RabbitMQ також має стратегію відновлення при «падінні». По-перше, є можливість зберігати черги на диск. Для цього використовується опція durable = true. Брокер підтримує кластеризацію, іншими словами розподілення на декілька вузлів. Якщо один вузол «падає» – інші вузли мають копії. Відповідно використовується наступна стратегія відновлення: якщо брокер «падає», решта кластеру продовжує працювати. Коли брокер перезапустився, він синхронізується з іншими вузлами, підключає споживачів повідомлень і продовжує роботу.

Рис. 4. Приклад маршрутизації черги за допомогою routing key

RabbitMQ має підтримку декількох способів автентифікації. Першим способом є вбудована автентифікація (Built-in), яка працює «з коробки» та може налаштовуватись через веб інтерфейс. Другим способом налаштування автентифікації є підключення зовнішніх плагінів, таких як LDAP або OAuth. Після автентифікації брокер контролює доступ до ресурсів за допомогою політики доступу.

Проаналізувавши відповідні джерела стає зрозуміло, що RabbitMQ напряму не може бути інтегрованим із СУБД безпосередньо, але може використовуватись як допоміжне ПЗ для організації обробки черг повідомлень у системах, де споживач та/або виробник можуть мати безпосереднє підключення до баз даних.

Окрім наведеного вище аналізу, було також протестовано декілька практичних кейсів, для апробацій певних тверджень технічної документації. Звісно в межах роботи неможливо покрити усі можливі варіанти подій, тож автори сфокусувалися на декількох найбільш загальних тестових сценаріях для розуміння принципів роботи вказаних брокерів повідомлень, можливостей для написання вихідного коду для взаємодії із цими брокерами.

По аналогії з попередніми викладками спершу протестуємо брокер повідомлень Apache Kafka. Програмні інструменти що використовуються в тестуванні, окрім безпосередньо брокера: Producer – програмне забезпечення, написане на мові програмування Java з використанням фреймворку Spring. Producer має можливість комунікувати з користувачем через http протокол. Це надає можливість керувати генерацією повідомлень з кожного брокера в порядку та з параметрами, що планується протестувати. Consumer - програмне забезпечення, написане на мові програмування Java з використанням фреймворку Spring. Consumer отримує повідомлення від брокера, затримує потік виконання на середній час і виводить повідомлення про успішну обробку. Curl – утиліта командного рядка для виконання HTTP-запитів. Вона дозволяє взаємодіяти з веб-сервісами, API, завантажувати або відправляти дані через різні протоколи (HTTP, HTTPS, FTP тощо). Цією утилітою буде відбуватись керування виробниками.

Вихідний код виробника повідомлень:

```
//файл конфігурації
@Configuration
public class ProgramConfig {

    @Value("${spring.kafka.bootstrap-servers}")
    private String bootstrapServers;

    @Bean
    public ProducerFactory<String, String> producerFactory() {
        Map<String, Object> configProps = new HashMap<>();
        configProps.put(ProducerConfig.BOOTSTRAP_SERVERS_CONFIG, bootstrapServers);
        configProps.put(ProducerConfig.KEY_SERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringSerializer.class);
        configProps.put(ProducerConfig.VALUE_SERIALIZER_CLASS_CONFIG, StringSerializer.class);
        return new DefaultKafkaProducerFactory<>(configProps);
    }

    @Bean
    public KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate() {
        return new KafkaTemplate<>(producerFactory());

    }

}
```

Контролер виробника повідомлень. Саме він буде отримувати повідомлення від користувача (тобто від нас) та відправляти ту кількість повідомлень до брокера, що задана параметром. Обидва параметри, повідомлення та їхня кількість задаються через http запити

```
@RestController
@RequestMapping("/api/kafka")
public class KafkaController {
```

```
    private final KafkaProducer kafkaProducer;

    public KafkaController(KafkaProducer producer)
    {
        this.kafkaProducer = producer;
    }

    @PostMapping("/send")
    public String sendMessage(@RequestParam(required = true) String message,
                              @RequestParam(required = false, defaultValue = "1") String count)
    {
        int messagesToSend = Integer.parseInt(count);
        for (int i = 0; i < messagesToSend; ++i)
        {
            kafkaProducer.sendMessage(message);
        }

        return ("Message: " + message + " sent from Producer " + messagesToSend + " times");
    }
}
```

Сервіс виробника для взаємодії з брокером

```
@Service
public class KafkaProducer {

    private static int messageId = 0;
    private final KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate;

    public KafkaProducer(KafkaTemplate<String, String> kafkaTemplate)
    {
        this.kafkaTemplate = kafkaTemplate;
    }

    public void sendMessage(String message)
    {
        String fullMessage = "Message ID: " + String.valueOf(messageId) + "message: " + message;
        kafkaTemplate.send("test-topic", fullMessage);
        System.out.println("Message sent: " + fullMessage);
        ++messageId;
    }
}
```

Вихідний код отримувача повідомлень. В цьому сервісі ми імітуємо ресурсозатратний процес, що триває 5 секунд:

```
@Service
public class KafkaConsumer {

    @KafkaListener(topics = "test-topic", groupId = "test-consumer-group")
    public void listen(String message) throws InterruptedException {
        System.out.println("Get message " + message);
        Thread.sleep((long) 5000);
    }
}
```

Тестовий сценарій (ТС1): нехай декілька виробників повідомлень почергово генерують певну кількість повідомлень, кількість залежить від вхідних параметрів. В даному сценарії відправимо 5 повідомлень з кожного виробника. Кожне повідомлення є унікальне, тобто має свій порядковий номер, що не повинен повторюватись в межах одного виробника. Це дозволить

відслідковувати порядок надходження повідомлень в чергу брокера. Що у свою чергу дозволить зробити висновки про можливість чи неможливість обробляти повідомлення згідно з пріоритетом чи іншими характеристиками, в залежності від можливостей налаштувань брокера. Брокер отримує повідомлення та відправляє його споживачу. Споживач імітує ресурсоємну роботу, тобто кожне повідомлення обробляється певний час. В цьому конкретному сценарії обумовимось, що середній час обробки повідомлення споживачем складає 5 секунд. Час обробки повідомлення будемо вважати середнім для всіх повідомлень.

Запустимо брокера:

```
bin\windows\zookeeper-server-start.bat config\zookeeper.properties
bin\windows\kafka-server-start.bat config\server.properties
```

Створимо тему. Тут треба врахувати що назва теми (topic), повинна співпадати в брокері-виробнику-споживачеві. Це дозволить правильно організувати процес обробки повідомлень.

```
bin\windows\kafka-topics.bat --create --topic test-topic --bootstrap-server localhost:9092 --partitions 1 --replication-factor 1
```

Перевіримо список тем:

```
bin\windows\kafka-topics.bat --list --bootstrap-server localhost:9092
```

Тепер запустимо 3 виробників на різних портах і споживача.

```
java -jar target/Producer.jar --server.port=8081
java -jar target/Producer.jar --server.port=8082
java -jar target/Producer.jar --server.port=8083
java -jar target/Consumer.jar
```

Відправимо 5 повідомлень з кожного виробника почергово, не очікуючи завершення обробки повідомлень споживачем:

```
curl -X POST "http://localhost:8081/api/kafka/send?message=HelloFromFirstBroker&count=5"
curl -X POST "http://localhost:8082/api/kafka/send?message=HelloFromSecondBroker&count=5"
curl -X POST "http://localhost:8083/api/kafka/send?message=HelloFromThirdBroker&count=5"
```

У виводі споживача отримаємо наступні повідомлення:

```
Get message Message ID: 0 message: HelloFromFirstBroker
Get message Message ID: 1 message: HelloFromFirstBroker
Get message Message ID: 2 message: HelloFromFirstBroker
...
Get message Message ID: 0 message: HelloFromSecondBroker
Get message Message ID: 1 message: HelloFromSecondBroker
Get message Message ID: 2 message: HelloFromSecondBroker
.
Get message Message ID: 0 message. HelloFromThirdBroker
Get message Message ID: 1 message. HelloFromThirdBroker
Get message Message ID: 2 message: HelloFromThirdBroker
```

Запустивши на виконання систему 5 разів, результат був таким самим. Звідси можна зробити попередній висновок, що налаштування брокера «із коробки» не розподіляють повідомлення якимсь чином, тобто повідомлення потрапляють у лог-файл згідно із надходженням у брокер і будуть оброблені за принципом FIFO.

ТС2. Продовжимо попередній сценарій. Вхідні умови та змінні залишимо без змін. Змінимо лише взаємодію брокера зі споживачем. Припустимо, споживач періодично виходить з ладу в процесі обробки повідомлення, а повідомлення продовжують надходити. Через деякий час запустимо споживача. Запустивши програму на виконання, та перезапустивши споживача 10 разів було проаналізовано його вихідну інформацію. Згідно з цією інформацією, consumer продовжує працювати з наступним повідомленням, що надійшло в чергу брокера. Тобто у випадках, коли виробник повідомлень продовжує надсилати повідомлення брокеру, а споживачі відсутні – брокер накопичує їх у лог-файлах і почне відправляти споживачам, щойно останні під'єднаються. Цей сценарій дає певне розуміння того, яким чином можна обробляти помилки при роботі споживача, а також яким способом можливо перерозподілити повідомлення між споживачами у моменти пікових навантажень.

Окрім того, було проведено аналіз можливостей логування роботи брокера. Згідно з документацією Apache Kafka має 3 рівні логування: INFO, ERROR, DEBUG. За замовчуванням

використовується рівень логів INFO. Це дає змогу проглядати роботу брокера в режимі реального часу і аналізувати нетипові події, що виникають. При цьому рівні логування не видно інформації, що consumer відключився. Але в той же час видно в файлах логів, коли споживач підключається. З чого можна зробити опосередковані висновки, щодо відключень споживача, тобто фактичного кінцевого обробника повідомлень і продовжити досліджувати причини таких відключень безпосередньо в логах самого споживача.

ТС3. Розглянемо сценарій, коли в процесі роботи виникають непередбачувані ситуації, і споживач через збій не може обробити повідомлення. Пропонується розглянути такий вид збою, де повідомлення саме по собі є правильним, тобто може бути оброблено повторно. Згідно з документацією до фреймворка, Apache Kafka має налаштування щоб повторно надсилати повідомлення, якщо ті не були оброблені. Змоделюємо ситуацію, коли кожне третє повідомлення призводить до збоїв. Для імітації збоїв, а також підтвердження обробки повідомлень, змінимо вихідний код Consumer'а.

```
@Service
public class KafkaConsumer {

    static int num = 0;

    @KafkaListener(topics = "test-topic", groupId = "my-consumer-group")
    public void listen(String message, Acknowledgment acknowledgment) throws InterruptedException {
        System.out.println("Get message " + message);
        Thread.sleep((long) 5000);
        if(++num % 3 == 0)
        {
            System.out.println("Unexpected exception");
            throw new InterruptedException("Unexpected exception");
        }
        System.out.println("Processed message " + message);
        acknowledgment.acknowledge();
    }
}
```

Окрім того, змінимо файл конфігурації споживача. Це потрібно для того, щоб правильно обробляти повідомлення і не зациклюватись на одному, навіть якщо збою не виникло:

```
spring.kafka.consumer.enable-auto-commit=false
spring.kafka.consumer.auto-offset-reset=latest
spring.kafka.listener.ack-mode=manual_immediate
```

За допомогою утиліти curl відправлено 30 повідомлень для брокера. У виводі споживача отримаємо наступні логи.

```
...
Get message Message ID: 23 message: HelloFromSecondBroker
Processed message Message ID: 23 message: HelloFromSecondBroker
Get message Message ID: 24 message: HelloFromSecondBroker
Unexpected exception

.
Get message Message ID: 24 message: HelloFromSecondBroker
Processed message Message ID: 24 message: HelloFromSecondBroker
Get message Message ID: 25 message: HelloFromSecondBroker
Processed message Message ID: 25 message: HelloFromSecondBroker
Get message Message ID: 26 message: HelloFromSecondBroker
Unexpected exception

.
Get message Message ID: 26 message: HelloFromSecondBroker
Processed message Message ID: 26 message: HelloFromSecondBroker
```

Як видно з логів споживача, якщо повідомлення не було оброблено, тобто, якщо не викликано метод acknowledgment.acknowledge(); Apache Kafka вважає що повідомлення не було

доставлено і відповідно не змінює офсет у лог-файлі. Це повинно гарантувати, що жодне повідомлення не буде втрачено

Наступним протестуємо брокер повідомлень RabbitMQ. Інструменти використовуються ті ж, що й у попередньому тестуванні зі змінами, доданими відповідно можливості використання із цим брокером. Окрім того, додамо незначних змін стосовно самих повідомлень, адже згідно із документацією, RabbitMQ (як і Apache Kafka) має можливість обробляти більш складні дані, аніж прості текстові рядки. Тож для прикладу використаємо JSON формат для передачі повідомлень в системі. Пропонується використати простий JSON об'єкт User, з наступними полями:

```
{"name": "Andrii", "age": 30}
```

Налаштування Producer'а в application.properties, для можливості підключення до брокера:

```
spring.rabbitmq.host=localhost
spring.rabbitmq.port=5672
spring.rabbitmq.username=guest
spring.rabbitmq.password=guest
rabbitmq.queue=myJsonQueue
rabbitmq.exchange=myJsonExchange
rabbitmq.routingKey=myJsonRoutingKey
```

Контролер для взаємодії з користувачем.

```
@RestController
@RequestMapping("/api/rabbitmq")
public class MessageController {

    private final RabbitMQJsonProducer rabbitMQJsonProducer;

    MessageController(RabbitMQJsonProducer rabbitMQJsonProducer) {
        this.rabbitMQJsonProducer = rabbitMQJsonProducer;
    }

    @PostMapping("/send")
    public String sendJsonMessage(@RequestBody User user) {
        rabbitMQJsonProducer.sendJsonMessage(user);
        return "JSON message sent";
    }
}
```

Сервіс відправника.

```
@Service
public class RabbitMQJsonProducer {

    private final RabbitTemplate rabbitTemplate;
    private final ObjectMapper objectMapper;

    @Value("${rabbitmq.exchange}")
    private String exchange;

    @Value("${rabbitmq.routingKey}")
    private String routingKey;

    public RabbitMQJsonProducer(RabbitTemplate rabbitTemplate, ObjectMapper objectMapper) {
        this.rabbitTemplate = rabbitTemplate;
        this.objectMapper = objectMapper;
    }

    public void sendJsonMessage(User user) {
        try {
```

```
            String jsonMessage = objectMapper.writeValueAsString(user);
            System.out.println("Sent JSON message to broker: " + jsonMessage);
            rabbitTemplate.convertAndSend(exchange, routingKey, jsonMessage);
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
    }
}
```

Споживач повідомлень має такі ж налаштування у application.properties для взаємодії з брокером, що й виробник, тож немає необхідності їх дублювати. Вихідний код сервісу споживача повідомлень:

```
@Service
public class RabbitMQJsonConsumer {

    private final ObjectMapper objectMapper;

    public RabbitMQJsonConsumer(ObjectMapper objectMapper) {
        this.objectMapper = objectMapper;
    }

    @RabbitListener(queues = "${rabbitmq.queue}")
    public void receiveJsonMessage(String message) {
        try {
            User user = objectMapper.readValue(message, User.class);
            System.out.println("Message received: " + user);
            Thread.sleep((long)5000);
        } catch (Exception e) {
            e.printStackTrace();
        }
    }
}
```

Повторимо тестові сценарії для даного брокера. ТС1 - відправимо декілька повідомлень за допомогою утиліти curl виробнику повідомлень. В якості об'єкту JSON використаємо вміст файлу testentity.txt із вмістом, описаним вище.

```
curl -X POST http://localhost:8081/api/rabbitmq/send -H "Content-Type: application/json" -d
@testentity.txt
```

Немає сенсу додавати подібні логи до цієї роботи. Проаналізувавши їх, автори зробили висновок подібний попередньому брокеру – з коробки, без налаштувань, повідомлення обробляються у порядку надходження. Окрім того, хотілося б звернути увагу на графічний інтерфейс даного брокера (див. рис. 3), в якому візуально можна побачити роботу брокера, підключених споживачів і т.д.

Повторимо тестовий сценарій 2, використаний для попереднього брокера. На відміну від Apache Kafka, у даному брокері при налаштуваннях «із коробки» в графічному інтерфейсі користувача є закладка Queues and Streams, в якій можна подивитись у режимі часу, наближеного до реального, скільки на даний момент споживачів підключено до брокера. Див. рис. 5, поле Consumers. При працюючій системі, зображеній на рис. 5 відправимо 10 повідомлень споживачу. Згідно зі статистикою на Overview вкладці ГУІ інтерфейсу видно, що повідомлення надійшли до брокера. Після того, як споживача було підключено до системи, повідомлення почали оброблятися згідно із записами на ГУІ інтерфейсі.

Рис. 5. Перегляд налаштувань брокера RabbitMQ. Кількість підключених споживачів.

Протестувавши також ТС 3 було підтверджено, що RabbitMQ також має можливості для гарантій обробки повідомлень споживачем. Щоб уникнути дублювань коду а також вихідних логів, надамо лише пояснення змін. По-перше, для ручного підтвердження обробки повідомлення споживачем, в його налаштування потрібно додати параметр AcknowledgeMode.MANUAL, що у свою чергу змусить в ручному режимі викликати підтвердження обробки повідомлення в сервісі споживача: channel.basicAck(tag, false), або у випадку помилки обробки, для повернення повідомлення в чергу - channel.basicNack(tag, false, true).

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі було проаналізовано такий вид програмних засобів як брокери повідомлень. Аналіз проводився на двох принципово різних за архітектурою брокерах повідомлень RabbitMQ та Apache Kafka. Такий аналіз дозволив більш ширше зрозуміти можливості даного виду ПЗ. Зрозуміти, які існують архітектурні підходи до створення брокерів повідомлень. Які можливості доставки повідомлень і способи підтвердження доставки використовуються у сучасних системах. Проаналізовано сучасні підходи до забезпечення захищеності в роботі брокерів за допомогою сучасних методів шифрування.

Дана робота дозволить більш точно сформувати вимоги до розробки власної системи обробки інформаційних потоків в системах доставки літальними апаратами. Після практичного тестування роботи брокерів можна з упевненістю сказати, що для побудови повноцінної системи обробки потоків повідомлень, брокер можна використовувати як допоміжне ПЗ при побудові системи з використанням архітектурної моделі Message-oriented middleware (MOM), коли розподілена система використовує повідомлення для зв'язку між вузлами чи модулями.

Список бібліографічного опису

1. Мороз Б. І., Крутяк А. С., Мороз Д. М., Мартиненко А. А. Математична модель раціональної організації обробки інформаційних потоків в системі доставки літальними апаратами. System technologies. 2024. Т. 2, № 151. С. 3–12. DOI: 10.34185/1562-9945-2-151-2024-01.
2. Мороз Б.І., Крутяк А.С., Мороз Д.М., Мартиненко А.А. Математична модель і загальний алгоритм вирішення задачі обробки повідомлень з урахуванням їх приоритетності і старіння в системах літальних апаратів. Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. 2024. № 5(154). С. 3 – 18. DOI: 10.34185/1562-9945-5-154-2024-01.
3. Переваги та недоліки сучасних фреймворків черг повідомлень (А. В. Кудашев). Електронний ресурс. URL: [illegible] (дата звернення 10.02.2025).
4. What is a message broker? Електронний ресурс. URL: [illegible] (дата звернення 02.03.2025).
5. Point-to-point messaging. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 10.02.2025).
6. Point-To-Point Messaging. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 10.02.2025).
7. Apache Kafka. Електронний ресурс. URL: [illegible] (дата звернення 15.03.2025).
8. Починаємо роботу з Apache Kafka. Частина I. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 01.03.2025).
9. We love change data capture. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 30.03.2025).
10. RabbitMQ. One broker to queue them all. Електронний ресурс. URL: [illegible] (дата звернення 20.03.2025).
11. Message Brokers: Queue-based vs Log-based. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 20.03.2025).
12. RabbitMQ Classic AMQP protocol. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 20.03.2025).
13. When to use RabbitMQ or Apache Kafka. Веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення 10.02.2025).
14. A. Calović, N. … Bosnđija, and S. Leines, "Microservice development using RabbitMQ message broker", Sci. Eng. Technol., vol. 2, no. 1, pp. 30–37, Apr. 2022, doi: 10.54327/set2022/v2.i1.19.

References

1. B. Moroz, A. Kruhlyk, D. Moroz, A. Martynenko. Mathematic model of the rational organization of the information flows processing in aircraft delivery system. *System technologies*. 2024. Т. 2, № 151. pp. 3–12. doi: 10.34185/1562-9945-2-151-2024-01
2. B. Moroz, A. Kruhlyk. Mathematical model and general algorithm for solving the problem of processing messages taking into account their value and aging in aircraft systems. *System technologies*. 2024. № 5(154). P. 3 – 18. DOI: 10.34185/1562-9945-5-154-2024-01
3. Advantages and disadvantages of modern message queue frameworks / A. Kudinkova. Website. URL: [illegible] (date of app. 10.02.2025).
4. What is a message broker? Website. URL: [illegible] (date of app. 02.03.2025).
5. Point-to-point messaging. Website. URL: [illegible] (date of app. 10.02.2025).
6. Point-To-Point Messaging. Website. URL: [illegible] (date of app. 10.02.2025).
7. Apache Kafka. Website. URL: https://kafka.apache.org/ (date of app. 15.03.2025).
8. Starting to work with Apache Kafka. Part I. Website. URL: [illegible] (date of app. 01.03.2025).
9. What is change data capture. Website. URL: [illegible] (date of app. 20.03.2025).
10. RabbitMQ: One broker to queue them all. Website. URL: https://www.rabbitmq.com/ (date of app. 20.03.2025).
11. Message Brokers: Queue-based vs Log-based. Website. URL: [illegible] (date of app. 20.03.2025).
12. RabbitMQ Cluster. AMQP protocol. Website. URL: [illegible] (date of app. 20.03.2025).
13. When to use RabbitMQ or Apache Kafka. Website. URL: [illegible] (date of app. 10.02.2025).
14. A. Cotović, N. Burnidža, and S. Lemes, "Microservice development using RabbitMQ message broker", Sci. Eng. Technol., vol. 2, no. 1, pp. 30–37, Apr. 2022, doi: 10.54327/set2022/v2.i1.19

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-22
УДК 004.92
Лиман Дмитро Миколайович, аспірант
https://orcid.org/0009-0001-1300-580X
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

СТРУКТУРА КЛАСИФІКАЦІЇ МЕТОДІВ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГРАФІВ ВЕЛИКОГО РОЗМІРУ

Лиман Д. М. Структура класифікації методів для візуалізації графів великого розміру. У статті розглядається актуальна проблема візуалізації графів великого розміру, яка супроводжується такими викликами, як ускладнення візуального сприйняття графа через велику кількість вершин та ребер, висока складність інтерпретації візуального представлення та низька швидкодія існуючих методів. У роботі виконано аналіз існуючих методів візуалізації, в результаті якого констатується відсутність строгої ієрархічної класифікації цих методів, що ускладнює їх систематизацію, вибір та виявлення перспективних напрямів для подальших досліджень. Метою даного дослідження є розробка структури класифікації існуючих методів візуалізації графів великого розміру. На основі аналізу останніх досліджень та публікацій виділено три основні категорії методів, що вирішують ключові задачі візуалізації: методи призначення координат вершинам і ребрам (охоплюють силові, спектральні, генетичні та засновані на графових нейронних мережах методи), методи обробки великих графів (охоплюють методи модифікації графа, вибірки підграфів, створення ієрархії, паралельних обчислень та застосування машинного навчання) та методи оптимізації візуального представлення графа (охоплюють методи мінімізації перетинів ребер, збільшення відстані між вершинами та адаптивного охолодження). Запропонована структура класифікації деталізує кожну з цих категорій на підкатегорії методів, враховуючи відмінності у підходах до вирішення різних частин загальної задачі візуалізації графів великого розміру. Розроблена структура систематизує наявні знання та створює основу для подальшої повної класифікації методів, яка сприятиме обґрунтованому вибору методів візуалізації відповідно до початкового графа, а також визначатиме напрями для розробки нових, більш ефективних методів візуалізації графів великого розміру.
Ключові слова: візуалізація графів, графи великого розміру, координати графів, паралельні обчислення, машинне навчання.

Lyman D. The Classification Structure of Methods for Large-Scale Graph Visualization. The article addresses the current challenge of large-scale graph visualization, which is accompanied by issues such as difficult visual perception due to the high number of vertices and edges, the complexity of interpreting visual representations, and the low efficiency of existing methods. The study analyzes existing visualization methods and concludes that there is no strict hierarchical classification, which complicates their systematization, selection, and identification of promising research directions. The goal of this research is to develop the classification structure for existing large-scale graph visualization methods. Based on an analysis of recent studies and publications, three main categories of methods solving key visualization tasks are identified: vertex and edge coordinate assignment methods (including force-directed, spectral, genetic, and graph neural network-based methods), large graph processing methods (covering graph modification, subgraph sampling, hierarchy creation, parallel computing, and machine learning methods), and graph visual representation optimization methods (including edge crossing minimization, vertex distance maximization, and adaptive cooling methods). The proposed classification structure details each of these categories into subcategories, considering differences in approaches to solving various aspects of large-scale graph visualization. The developed structure systematizes existing knowledge and provides a foundation for further comprehensive method classification, facilitating informed method selection based on the input graph and identifying directions for developing new, more efficient large-scale graph visualization methods.
Keywords: graph visualization, large-scale graphs, graph coordinates, parallel computing, machine learning.

Постановка наукової проблеми. Візуалізація графів великого розміру є однією з важливих задач в багатьох галузях науки і техніки, таких як комп'ютерні науки, соціальні мережі, біоінформатика та інші. У галузях, де проміжні чи кінцеві дані можуть бути представлені у вигляді графа, типовими є випадки, в яких кількість вершин і ребер графа може бути більшою за одну тисячу. Відповідно візуалізація такого роду даних має наступні проблеми: перевантаження інформацією, складність інтерпретації результатів, необхідність ефективного представлення великих обсягів даних у межах обмеженого екранного простору та зручність переходу від загального представлення графа до значень і зв'язків конкретних вершин.

На даний момент було розроблено вже немало методів для візуалізації великих графів, однак вони стикаються з проблемами швидкодії обробки інформації, а саме з незадовільним часом виконання підрахунку координат і власне візуалізації отриманого результату. Більшість методів зосереджуються на оптимізації окремих аспектів візуалізації, таких як покращення сприйняття структурної інформації (за рахунок розосередження вершин, зменшення кількості перетинів між ребрами) або зменшення навантаження на ресурси центрального процесора комп'ютера. Також невирішеною є проблема обробки у реальному часі даних, які представлені у вигляді графа і кількість яких збільшується з плином часу.

Наразі є достатньо великий обсяг інформації щодо різних аспектів візуалізації графів великого розміру, але строга ієрархічна класифікація методів, які використовуються для реалізації цих аспектів, все ще є відсутньою.

Таким чином, задача розробки структури класифікації (а згодом і самої класифікації) існуючих методів візуалізації великих графів з метою визначення їхніх переваг, недоліків і особливостей застосування є актуальною. Це дозволить не лише покращити розуміння існуючих підходів, а й сприятиме розробці нових методів, які можуть вирішити проблеми, пов'язані з обробкою даних великого обсягу, що представлені у вигляді графів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні підходи до вирішення складних проблем візуалізації великих наборів даних, які можуть бути представлені у вигляді графа. В цілому, усі дослідження по створенню і реалізації методів обробки графів для подальшої візуалізації можна розділити на три категорії:

1. Методи привоєння координат вершинам і ребрам на декартовій системі координат.
2. Методи оптимізації використання ресурсів комп'ютера при визначенні координат вершин великих графів.
3. Методи оптимізації візуального представлення графів на площині

У цій статті проаналізовано всі три категорії методів, що застосовуються в рішеннях такої комплексної проблеми візуалізації.

Для підрахунку координат вершин і ребер, дослідниками вже було розроблено немало методів, кожен з яких використовує різні обчислювальні парадигми. Найпоширенішими за використанням серед них є методи силового моделювання, спектральні методи та їх комбінація з силовим моделюванням, методи генетичних алгоритмів, а також нові методи, які використовують графові нейронні мережі. Одним із найефективніших рішень для візуалізації графів є використання методів силового моделювання, які базуються на моделюванні фізичних сил між вершинами і ребрами. Такі методи ітеративно намагаються мінімізувати кількість перетинів між ребрами та рівномірно розподіляють вершини у просторі заданої площини візуалізації.

Завдяки своїй універсальності, методи силового моделювання є типовим рішенням для візуалізації графів з різним масштабом, особливо коли важливо відобразити структуру графа у вигляді, зручному для сприйняття користувачем. Більшість з них не є детермінованими, оскільки використовують псевдовипадкові числа на етапі генерації початкових координат або інших етапах роботи методу. Незважаючи на останні досягнення, виконання обробки цими методами на великому графі може зайняти хвилини або години, оскільки в найгірших випадках виникає квадратична залежність від кількості вершин [2]. Зважаючи на це, деякі дослідники намагаються зменшити час обробки графа за такими методами, модифікуючи початкову структуру даних через видалення вершин і ребер. Іншим підходом є розбиття оригінального графа на менші графи за допомогою створення ієрархії.

У статті [3] описується один з можливих методів модифікації графа за допомогою заміни декількох ребер на одне. Метод, що описаний в цій статті, досягає певного пришвидшення виконання процесу привоєння координат вершинам, але це пришвидшення є тільки незначним, особливо для великих графів із кількістю вершин 10000 або більше, причому з втратою інформації у візуальному представленні графа порівняно з вхідним графом.

У роботі [4] автори експериментально підтверджують припущення, що отримання високої якості розташування вершин методом силового моделювання є можливим для композицій графів з кількістю вершин від 10 до навіть 5000 і середнім степенем вершини 7. Тут і надалі, під якістю розташування вершин мається на увазі зрозумілість, зручність та естетичне сприйняття графа після візуалізації [5]. Можливим недоліком для практичного застосування описаного у роботі [4] методу є введення множини обмежень на початковий граф, що зменшує універсальність його використання.

Окрім метода описаного у роботі [4], який накладає обмеження на тип вхідного графа (тільки для складених графів), існують методи, що намагаються визначити ієрархію вершин графа самостійно. Після визначення ієрархії стає можливим зменшення кількості вершин у підрахунку силової моделі графа за допомогою використання таких підходів, як в роботі [4]. Наприклад, у роботі [6] автор описує метод використання послідовності все менш і менш точних версій оригінального графа, які створюються шляхом розбиття графа на множини вершин за певними ознаками. На кожному наступному кроці такі множини об'єднують в одну вершину і процес повторюється. Недоліком цього методу є ігнорування загальної структури графа, що може бути

вирішальним для розуміння вхідного графа. Тут і надалі, під загальною структурою графа мається на увазі зведення графа [7], тобто об'єднання вершин графа згідно їх семантичних значень у домені застосування цього графа.

Іншим напрямом роботи дослідників для вирішення задачі скорочення часу обробки графа методами присвоєння координат вершинам графа на площині є використання розпаралелення процесу обробки графів за допомогою апаратних прискорювачів. Найчастіше розпаралелення виконується для методів категорії силового моделювання графів. У роботі [8], автори використовують вищезгадані методи для виконання серії спрощень оригінального графа, але фокусують свою увагу на паралельних обчисленнях. Це дозволяє зменшити час роботи обробки графів згідно із силовою моделлю присвоєння координат вершинам графа. Автори роботи [8] розробили метод з розпаралеленим розрахунком координат під назвою BatchLayout, який може суттєво збільшити швидкодію. Однак, це дослідження орієнтоване тільки на один аспект обробки графів, а саме на аспект обчислювальної ефективності, і не зосереджується на аспектах, що орієнтовані на користувача. Наприклад таких, як можливо різне виконання процесу обробки графа методом присвоєння координат для одного й того ж графа від запуску до запуску обробки (бо граф вже змінився) або оновлення графа в реальному часі.

Усі методи, що зазначені вище, використовують силову модель для присвоєння координат вершинам графів. Зважаючи на розвиток машинного навчання та генеративних моделей, були вже розроблені й альтернативні методи, де координати присвоюються вершинам методами генетичних алгоритмів [9] або графовими нейронними мережами [10]. У цих методах використовуються показники розходження графа на всю доступну площину, перетину ребер графа та наближеності вершин графа одна до одної. Оригінальна ідея була запропонована у статті [9], що полягає у використанні генетичного методу для покращення початкового результату відображення графа, на основі якого буде розраховано кінцеві результуючі координати вершин. Але недоліком цього методу є необхідність подання вхідних даних у вигляді ієрархічної структури.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Згідно з проведеним аналізом існуючих методів, можна виділити наступні невирішені частини загальної проблеми візуалізації графів великого розміру.

1. Ігнорування загальної структури оригінального графа. З метою часткового рішення цієї проблеми, а саме покращення сприйняття і розуміння графа людиною, можна запропонувати сумісне використання методів, які враховують наявність кластерів та інших структурних елементів у графах.
2. Мала кількість досліджень, які присвячені розробці нових методів присвоєння координат. Типовим методом для присвоєння координат є метод силового моделювання і більшість дослідників фокусуються саме на його модернізації чи оптимізації. Але при цьому недостатньо уваги приділяється методам, що використовують машинне навчання і штучний інтелект для присвоєння координат вершинам графа.
3. Недостатня швидкість обробки графів. Хоча наразі вже існують методи прискорення обробки графів за допомогою розпаралелення процесу такої обробки, але в цьому напрямі все ще залишається великий простір для подальших досліджень, особливо враховуючи постійний прогрес у розвитку багатопроцесорних і багатоядерних апаратних засобів.
4. Недостатня системність наявних досліджень у сфері оптимізації візуального представлення графів. Такий вид оптимізації є важливим для покращення методів, робота яких включає автоматизовану оцінку отриманого результату присвоєння координат вершинам графа, наприклад визначення фітнес-функції.

Розробка нових методів, які дозволили б усунути вказані обмеження та недоліки існуючих методів або хоча б зменшити їх величину, може значно покращити ефективність і якість візуалізації графів. Тому, розробка таких методів є актуальною задачею.

Мета дослідження. Наразі вже була розроблена значна кількість методів для візуалізації графів великого розміру, кожен з яких має свої особливості присвоєння координат, обробки великих графів чи оптимізації візуального представлення графів. Але, як зазначалося вище, все ще є невирішені частини цієї проблеми. Тому метою цього дослідження є розробка структури класифікації існуючих методів для візуалізації графів великого розміру, яка виділила б певні категорії цих методів за деякими ознаками та властивостями таких методів. Структура класифікації

має враховувати різні аспекти візуалізації графів, такі як обробка великих графів, оцінка їх візуального представлення, методи для присвоєння координат використовуючи навчання нейронних мереж, попередню обробку графа, паралельні обчислення та інші технологічні аспекти, що впливають на якість та ефективність візуалізації графів

На наступному етапі дослідження планується виконати власне класифікацію існуючих методів візуалізації графів великого розміру згідно з цією структурою класифікації. Розробка структури такої класифікації та в подальшому власне класифікації дозволила б систематизувати інформацію про існуючі методи, що, з однієї сторони, буде сприяти ефективному вибору та застосуванню цих методів відповідно до специфіки задачі, а з другої сторони, буде визначати потенційні напрями розробки нових методів візуалізації великих графів з кращими характеристиками, ніжу існуючих методів

Основний матеріал дослідження.

Для створення структури класифікації спочатку серед існуючих методів необхідно виділити великі категорії (групи) методів першого рівня класифікації, які б згрупували ці методи за найбільш загальними задачами, що виникають при обробці графів великого розміру. Після цього потрібно в кожній із категорій першого рівня виділити категорії методів наступного рівня згідно з відмінностями у підходах, які вони використовують для вирішення поставлених задач.

На першому рівні структури класифікації методів візуалізації графів великого розміру виділимо три великі загальні категорії (групи) методів.

1. Категорія методів присвоєння координат. Ця категорія зорієнтована на дослідження, які визначають розташування вершин і ребер у просторі для відображення графа. До таких методів належать методи, що базуються на фізичних моделях, а також методи, які забезпечують зрозуміле та інтуїтивне представлення графів. Ці методи є основою для візуалізації, оскільки вони безпосередньо впливають на сприйняття інтерпретації даних
2. Категорія методів обробки великих графів. Ця категорія охоплює методи, спрямовані на ефективну роботу з великими обсягами даних, а саме з графами, що мають тисячі або мільйони вершин і ребер. Ці методи зорієнтовані на процеси, за якими відбувається спрощення обробки великих графів за рахунок перетворень оригінального графа чи адаптації обчислень до паралельних обчислювальних систем з більшою кількістю ядер (GPU).
3. Категорія методів оптимізації візуального представлення графів. Ця категорія містить методи, які виконують певні оптимізаційні дії щодо візуалізації великих графів, зокрема виконують мінімізацію перетинів ребер, збільшення відстані між сусідніми вершинами, адаптивне охолодження. Крім того, такі методи використовують підходи, які дозволяють інтуїтивно аналізувати дані, що представлені у вигляді графів.

Структура класифікації методів візуалізації графів, згідно із поділом таких методів на три зазначених категорії верхнього рівня, показана на рис. 1.

Розглянемо тепер наступний рівень структури такої класифікації, поділивши методи кожної із зазначених категорій першого рівня на більш детальні категорії (підгрупи) методів.

Серед методів категорії присвоєння координат особливе місце посідають методи силового моделювання, що були використані у всіх проаналізованих вище дослідженнях. Принцип силового моделювання заснований на фізичних моделях, де вершини графа розглядаються як часточки, що взаємодіють між собою через сили тяжіння та відштовхування. Ребра графа розглядаються як пружини, які утримують вершини на певній відстані. Популярність методів цієї категорії пояснюється їх універсальністю при застосуванні до різних типів чи структур графів та ітеративним методом роботи. Ітеративність дозволяє користувачу знаходити баланс між часом візуалізації та якістю зображення, які знаходяться в оберненій залежності.

Спектральні методи для визначення координат вершин використовують матричне представлення графів (матриці суміжності або матрицю Кірхгофа). Підрахунок власних векторів та власних значень у цих методах базується на положеннях лінійної алгебри та на спектральній теорії графів. Присвоєння координат вершин за спектральним методом підходить для графів, які мають високий степінь зв'язності і які не розділені на неявні підграфи. Саме через цю особливість у роботі [8] методи спектрального присвоєння координат поєднуються з методами силового моделювання. При такому поєднанні спектральний метод використовується для присвоєння координат загальної

структури графа, оскільки він має високу швидкість роботи на великих обсягах вхідних даних, а силове моделювання дозволяє отримувати візуально прийнятний результат для оригінальних вершин графа. У такому поєднанні використовуються сильні сторони кожного з методів, що дозволяє зменшити час роботи, який потрібен для виконання присвоєння координат.

Рис.1. Структура класифікації методів, що застосовуються для візуалізації графів

Одним з перспективних шляхів розвитку категорії методів присвоєння координат є об'єднання методів силового моделювання з методами машинного навчання [10] або з евристичними методами на основі генетичних алгоритмів [9]. У публікації [10] пропонується концептуальна система нейронної графової візуалізації даних, яка використовує здатність нейронних мереж до ефективного представлення та обчислення. Це дозволяє продемонструвати, що налаштування параметрів функцій втрат, які керують типовим процесом візуалізації графів, може

бути безпосередньо забезпечене нейронною мережею. Зокрема, ця стаття зосереджується на критеріях перетину ребер, демонструючи, що нейронна мережа може навчитися визначати, чи перетинаються два ребра, і забезпечувати налаштування параметрів функції втрат для досягнення стану графа без перетинів. Такі властивості є важливими, оскільки функцію втрат для визначення перетину ребер графа не можна оптимізувати напряму через її недиференційованість.

Серед методів категорії першого рівня структури класифікації, що орієнтовані на обробку великих графів, одними з найпростіших є методи візуалізації з видозміною початкового графа, а саме методи об'єднання вершин та ребер графа. Автор роботи [3] розширює власні попередні дослідження шляхом застосування методів об'єднання ребер для прискорення обчислення сил пружності. Його експерименти на 72 графах показали, що результат роботи з вибірковим об'єднанням ребер досягає таких зображень графів, що візуально схожі із зображеннями початкових графів, до яких зміни ще не вносились. Цей результат підтверджується візуалізаціями отриманих графів [3].

Серед методів вибірки підграфів, вартим уваги є метод, що представлений в [4]. Цей метод забезпечує прискорення роботи присвоєння координат вершинам для графів, які є композиціями графів. Прискорення роботи, порівняно з силовим моделюванням, досягається за рахунок поєднання спектрального методу з силовим моделюванням. Першим етапом виконується спектральний метод присвоєння координат, де підграф розглядається як вершина. На другому етапі, відбувається присвоєння координат методом силового моделювання вершинам кожного окремого підграфа, використовуючи координати з першого етапу для початкових значень координат. Варто зауважити, що на другому етапі, обчислення силового моделювання відбувається лише для вершин підграфа, не враховуючи вершини з інших підграфів.

Із категорії методів створення ієрархії розглянемо метод, що описаний у роботі [8]. За цим методом відбувається виділення ієрархії вершин початкового графа для отримання послідовності все менш і менш точних версій оригінального графа. Менш точна версія оригінального графа створюється шляхом визначення найбільших множин вершин, які мають високий ступінь зв'язності між вершинами самої множини і не зв'язані або мають низький ступінь зв'язності з вершинами інших множин. Зменшення часу роботи методу силового моделювання досягається за рахунок обробки не всіх вершин графа одночасно, а лише вершин графів найменшої точності. Кінцевий результат, що полягає у присвоєнні координат для оригінальних вершин графа, досягається за рахунок апроксимації від найбільш до найменш грубої версії початкової вхідної структури даних. Завдяки такому підходу, цей метод також вирішує проблему можливого збігу до локальних центрів тяжіння і спотворення оригінальної структури, яка виникає із-за використання псевдовипадкових чисел для присвоєння початкових координат вершинам.

Серед методів, що застосовують паралельні обчислення, найчастіше використовуються паралельні версії методів присвоєння координат вершинам великих графів. У статті [8] описано адаптацію метода силового моделювання до матричних структур даних, обробка яких може бути ефективно розпаралелена і прискорена на графічних платах GPU. Така адаптація ґрунтується на використанні спільної пам'яті та більшої кількості ядер у GPU порівняно з паралельним обчисленням на CPU, а також на групуванні вершин у міні-пакети та паралельній обробці всіх вершин, які належать одному міні-пакету. Автори роботи [8] експериментально підтвердили, що їхній оригінальний метод дозволяє значно скоротити час обчислень координат завдяки використанню підходу, що включає паралельне обчислення та обробку міні-пакетів на GPU. Аналогічний міні-пакетний підхід широко використовується також при реалізації навчання глибоких нейронних мереж у формі міні-пакетного стохастичного градієнтного спуску (SGD). У статті [8] цей підхід був адаптований до процесу компонування графів, що дозволило досягти кращої паралельної продуктивності. Одним з можливих шляхів розвитку такого підходу є об'єднання обчислювальної потужності кількох комп'ютерних систем у одну мережу, що збільшило б можливості масштабування методів присвоєння координат вершинам.

Ще однією групою методів у категорії обробки великих графів є методи, що базуються на машинному навчанні. Автори роботи [10] пропонують новий метод Graph Neural Drawers (GND), який застосовує методи машинного навчання для визначення координат вершин графа. На відміну від класичних методів, що використовують явні правила або ітеративні обчислення, GND ґрунтується на моделі, яка навчається на даних, отриманих від застосування різних існуючих методів візуалізації (наприклад, силового моделювання чи спектрального аналізу). Це дозволяє

моделі виявляти закономірності в розташуванні вершин і узагальнювати їх для генерації координат навіть для графів, які не були представлені під час навчання. Ключова особливість підходу у запропонованому в [10] методі машинного навчання полягає в інтеграції навчальних процедур, спрямованих на оптимізацію якості візуалізації шляхом аналізу великих наборів даних.

Категорія методів оптимізації візуального представлення графів охоплює низку підходів, спрямованих на покращення структурованості та якості розташування вершин для подальшого аналізу дослідниками. Особливість методів цієї категорії полягає в тому, що в існуючих роботах вони використовуються лише як додатковий інструмент для покращення чи оцінювання методу привоєння координат. У цій категорії можна виділити такі підгрупи:

1. Методи мінімізації перетинів ребер. Наприклад, у роботі [10] був використаний критерій кількості перетинів ребер для оцінки результатів машинного навчання. Таким чином, запропонований в цій роботі метод привоєння координат також фокусується на мінімізації кількості перетинів ребер.
2. Методи збільшення відстані між сусідніми вершинами. Наприклад, у роботі [9] генетичний алгоритм комбінується з метриками розлогості/скупчення (sprawl/clutter) для побудови ієрархії графу. Цей підхід дозволяє шляхом ітераційного відбору знаходити таке розташування вершин графу, при якому вершини з вищим степенем зв'язності будуть віддалені одна від одної для уникнення скупчення, а з'єднані з ними вершини з нижчим степенем зв'язності будуть розташовані ближче до них.
3. Методи адаптивного охолодження базуються на фізичних аналогіях (як у методах силового моделювання). Наприклад, у дослідженні [6] запропоновано метод адаптивного охолодження, що динамічно регулює параметри силового моделювання для уникнення локальних мінімумів. Цей метод є особливо ефективним для великих графів, оскільки дозволяє ефективно розподіляти вершини, зберігаючи оптимальні відстані між сусідніми вершинами.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Проведене дослідження спрямоване на розробку структури класифікації, яка дозволяє систематизувати інформацію про існуючі методи візуалізації графів великого розміру. Проведений аналіз виокремив чотири основні обмеження таких методів: ігнорування структури оригінального графа, недостатнє дослідження альтернативних методів привоєння координат, низьку швидкість обробки даних та допоміжний характер використання методів оптимізації візуального представлення графів.

Розроблена структура класифікації не лише систематизує знання про категорії існуючих методів, але й стає основою для їхньої подальшої повної класифікації, створення якої планується на наступному етапі дослідження. Така класифікація дозволить виконувати цілеспрямований вибір найбільш доцільних методів візуалізації графів відповідно до специфіки конкретних задач. Крім того, така класифікація допоможе виявляти прогалини в поточних дослідженнях методів візуалізації графів і покаже напрямки для розробки нових методів з покращеною продуктивністю та якістю візуалізації, що може стати ключем до подолання обмежень у візуалізації графів великого розміру.

Список бібліографічного опису:

1. Granjean M. "Introduction to Data Visualization: Network Analysis in History and Information" volume 18/19. Bern. 2015. P. 109-128. URL: https://url.ch/eumpo (access date: 15.01.2025).

2. Gove R. "A Random Sampling O(n) Force-calculation Algorithm for Graph Layouts". Computer Graphics Forum. volume 38, 10 July 2019. P. 739-751. URL: https://doi.org/10.1111/cgf.13721 (access date: 15.12.2024).

3. Gove R. "Force-Directed Graph Layouts by Edge Sampling". 2019 IEEE 9th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV). Vancouver, Canada, 2019. Vancouver, 2019. P. 1-5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8944364 (access date: 30.01.2025).

4. Balci H., Dogrusoz U. "fCoSE: A fast Compound Graph Layout Algorithm with Constraint Support". IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, volume 28, no. 12. Piscataway, US, 1 December 2022. Piscataway, 2022. P. 4582–1593. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9477202 (access date: 28.11.2024).

5. Purchase H. "Which aesthetic has the greatest effect on human understanding?". Lecture Notes in Computer Science, vol 1353. Springer, Berlin, Heidelberg, 29 July 2005. P. 248–261. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-63938-1_67.pdf.

6. Yifan H. "Efficient and High Quality Force-Directed Graph Drawing". Mathematica Journal Vol. 10. Champaign, US, 7 September, 2006. Champaign, 2005. P. 37-71. URL: http://yifanhu.net/PUB/graph_draw_small.pdf (access date: 31.01.2025).

7. Tezzi E. "GraSS: Graph Structure Summarization". Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining. April 29 - May 1, 2010, Columbus, Ohio, USA. SDM, 2010. P. 454-465. URL: https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611972801.10

8. Rahman M. K., Sujon M.H., Azad A. "ForceAtlas2, A Batch-Parallel Force-Directed Graph Layout Algorithm in Shared Memory". 2020 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Tianjin, China, 2020. Tianjin, 2020. P. 16-25. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9086287 (access date: 20.11.2024).

9. Murakami A., Itoh T. "Optimization of Hierarchical Graph Layout with a Genetic Algorithm and Sprawl/Clutter Metrics". 2023 27th International Conference Information Visualisation (IV). Tampere, Finland, 2023. Tampere, 2023. P. 166-171. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10303297 (access date: 25.11.2024).

10. Tiezzi M., Ciravegna G., Gori M. "Graph Neural Networks for Graph Drawing". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, volume 35, no. 4, Piscataway, US, April, 2024. Piscataway, 2024. P. 4668–4681. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9810169 (access date: 12.12.2024).

References:

1. Grandjean M. "Introduction to Data Visualization. Network Analysis in History and Information", volume 18/19. Bern, 2015. P. 109-128. URL: https://url.ch/enmpyo (access date: 15.01.2025).

2. Gove R. "A Random Sampling O(n) Force-calculation Algorithm for Graph Layouts". Computer Graphics Forum, volume 38, 10 July 2019. P. 739-751. URL: https://doi.org/10.1111/cgf.13721 (access date: 15.12.2021).

3. Gove R. "Force-Directed Graph Layouts by Edge Sampling". 2019 IEEE 9th Symposium on Large Data Analysis and Visualization (LDAV). Vancouver, Canada, 2019. Vancouver, 2019. P. 1-5. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8944364 (access date: 30.01.2025).

4. Balci H., Dogrusoz U. "fCoSE: A Fast Compound Graph Layout Algorithm with Constraint Support". IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, volume 28, no. 12. Piscataway, US, 1 December 2022. Piscataway, 2022. P. 4582–4593. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9477202 (access date: 28.11.2024).

5. Purchase H. "Which aesthetic has the greatest effect on human understanding?". Lecture Notes in Computer Science, vol 1353, Springer, Berlin, Heidelberg, 29 July 2005. P. 248–261. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-63938-1_67.pdf

6. Yifan H. "Efficient and High Quality Force-Directed Graph Drawing". Mathematica Journal Vol. 10, Champaign, US, 7 September, 2006. Champaign, 2006. P. 37-71. URL: http://yifanhu.net/PUB/graph_draw_small.pdf (access date: 31.01.2025).

7. Tezzi E. "GraSS: Graph Structure Summarization". Proceedings of the SIAM International Conference on Data Mining. April 29 - May 1, 2010, Columbus, Ohio, USA. SDM, 2010. P. 454-465. URL: https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611972801.10

8. Rahman M. K., Sujon M.H., Azad A. "ForceAtlas2, A Batch-Parallel Force-Directed Graph Layout Algorithm in Shared Memory". 2020 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Tianjin, China, 2020. Tianjin, 2020. P. 16-25. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9086287 (access date: 20.11.2024).

9. Murakami A., Itoh T. "Optimization of Hierarchical Graph Layout with a Genetic Algorithm and Sprawl/Clutter Metrics". 2023 27th International Conference Information Visualisation (IV). Tampere, Finland, 2023. Tampere, 2023. P. 166-171. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10303297 (access date: 25.11.2024).

10. Tiezzi M., Ciravegna G., Gori M. "Graph Neural Networks for Graph Drawing". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, volume 35, no. 4, Piscataway, US, April, 2024. Piscataway, 2024. P. 4668–4681. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9810169 (access date: 12.12.2024).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-23
УДК 004.02

Марченко Олексій Олександрович, асистент
https://orcid.org/0000-0002-5080-4811
Марченко Олександр Іванович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4537-3420
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

АНАЛІЗ КЕРУВАННЯ ФОРМОЮ ДЕРЕВА ПОШУКУ MCTS ЗА ДОПОМОГОЮ КРИТЕРІЇВ ВИДУ «ГЛИБИНА-ШИРИНА»

Марченко О. О., Марченко О. І. Аналіз керування формою дерева пошуку MCTS за допомогою критеріїв виду «глибина-ширина». В цій статті розглядається перевірка та аналіз здатності способу вдосконаленого пошуку по дереву методом Монте-Карло за допомогою контролю форми дерева пошуку MCTS-TSC (Monte-Carlo Tree Search with Tree Shape Control), який був розроблений авторами раніше, виконувати такий контроль. Принцип керування формою дерева пошуку у способі MCTS-TSC базується на застосуванні критеріїв DW (Depth-Width) виду «глибина-ширина». Перевірка здатності MCTS-TSC контролювати та скеровувати в потрібному напрямку форму дерева пошуку в процесі його побудови проводилася на численних знімках партій гри Connect Four, які були зіграні гравцями, що грали як за стандартною реалізацією пошуку по дереву методом Монте-Карло, яка називається MCTS-UCT (Monte-Carlo Tree Search with Upper Confidence bounds applied to Trees), так і за реалізацією способу такого пошуку з контролем форми дерева MCTS-TSC. З метою порівняння процесу побудови дерева пошуку стандартним способом MCTS-UCT і способом із застосуванням контролю за формою дерева MCTS-TSC були отримані дерева, побудовані після виконання однакової кількості ітерацій процесу пошуку і з різними значеннями налаштування параметрів критеріїв виду DW для контролю форми дерев в процесі їх побудови. Після цього була зібрана статистика форм побудованих дерев пошуку і виконаний порівняльний аналіз форми побудованих дерев пошуку і відмінностей процесу їх побудови обома способами пошуку. Проведена апробація та аналіз форми побудованих дерев пошуку показали, що спосіб пошуку по дереву за допомогою контролю форми дерева MCTS-TSC на основі встановлення певних параметрів формули критеріїв виду «глибина-ширина», не змінюючи загального асиметричного принципу побудови дерева пошуку, дозволяє скерувати процес цієї побудови до більш широкої і неглибокої форми дерева, або до більш вузької і глибокої форми. Отримані результати підтверджують здатність способу MCTS-TSC керувати формою дерева пошуку MCTS за допомогою критеріїв виду «глибина-ширина».

Ключові слова: пошук в дереві методом Монте-Карло, MCTS, MCTS-UCT, контроль форми дерева пошуку, критерії виду «глибина-ширина», MCTS-TSC.

Marchenko Oleksii, Marchenko Oleksandr Analysis of MCTS search tree shape control using "depth-width" kind criteria. This article examines the verification and analysis of ability of the MCTS-TSC (Monte-Carlo Tree Search with Tree Shape Control) improving technique, which was developed by the authors earlier, to perform such control. The principle of controlling the shape of the search tree in the MCTS-TSC technique is based on the application of DW (Depth-Width) criteria of the "depth-width" kind. The ability of the MCTS-TSC to control and correct the shape of the search tree during its construction was tested on multiple games of Connect Four played by players which used both the standard Monte Carlo tree search technique called MCTS-UCT (Monte-Carlo Tree Search with Upper Confidence bounds applied to Trees) and the MCTS-TSC technique with control of the tree shape. In order to compare the search tree construction process by the standard MCTS-UCT technique and the MCTS-TSC tree shape control technique, trees were obtained after performing the same number of iterations of the search process and with different setting values parameters of the DW kind criteria for controlling the shape of trees during their construction. After that, statistics of the constructed search trees shape were collected and comparative analysis of the constructed search trees shapes and differences in the process of their construction by both search techniques was performed. The approbation and analysis of the shape of the built search trees showed that the MCTS-TSC technique of tree search by controlling the shape of the tree based on setting certain parameters of the formulas of the "depth-width" kind criteria, without changing the general asymmetric principle of building the search tree, allows you to direct the process of this construction to a wider and shallow tree shape, or to a narrower and deeper shape. The obtained results confirm the ability of the MCTS-TSC technique to control the shape of the MCTS search tree using depth-width criteria.

Keywords: Monte-Carlo tree search method, MCTS, MCTS-UCT, search tree shape control, criteria of the "depth-width" kind, MCTS-TSC.

Постановка наукової проблеми.

Дерева рішень, які представляють зв'язки між інформаційними ресурсами певної задачі, є популярною, широко використовною і ефективною з алгоритмічної точки зору структурою даних для розв'язку цієї задачі. Сучасні задачі в галузі штучного інтелекту відзначаються надзвичайно великим, можна навіть сказати гігантським, обсягом інформації, в якій потрібно знаходити необхідні інформаційні елементи. Причому знаходити потрібно за прийнятний час, що, враховуючи гігантський обсяг інформації, є неймовірно складною задачею. Одним з методів пошуку у деревовидних структурах даних, який виявив високу ефективність знаходження найкращих рішень

в умовах таких вимог є пошук по дереву методом Монте-Карло MCTS (Monte-Carlo Tree Search) [1]. Вже було запропоновано багато способів підвищення ефективності цього методу, але складність задач та обсяги даних цих задач також зростають. Тому проблема дослідження методів пошуку в інформаційних деревах рішень з метою створення і реалізації таких методів, щоб задовольнити жорстким вимогам задач галузі штучного інтелекту щодо часу виконання і використання пам'яті комп'ютерних систем наразі залишається і ще довго буде залишатися однією з найактуальніших задач цієї галузі.

Аналіз попередніх досліджень

Як відомо, одна ітерація пошуку методом MCTS складається з чотирьох етапів: 1) вибору; 2) розширення; 3) моделювання; 4) зворотного перерахування. Ключовим елементом цього методу є його основна формула UCB1 (1), за допомогою якої в дереві пошуку відбувається оцінювання перспективності наступних можливих дій (ходів в іграх) і власне вибір однієї з вершин-нащадків поточної вершини, яка відповідає найбільш перспективному наступному ходу:

$$UCB1 = \frac{NodeWins}{NodePlayouts} + 2 * C_{UCB1} * \sqrt{2 * \frac{\ln(ParentPlayouts)}{NodePlayouts}} \quad (1)$$

де

NodeWins – кількість виграшів гри при взятті даної вершини;

NodePlayouts – кількість разів проходження гри через дану вершину;

ParentPlayouts – кількість разів проходження гри через батьківську вершину даної вершини;

C_{UCB1} – параметр для налаштування процесу пошуку.

Як зазначено вище, наразі вже існує велика кількість способів вдосконалення методу MCTS [1–4]. Ефективність цього методу підвищували різними способами, серед яких найбільш характерними є такі:

1) способи, що орієнтовані на вдосконалення виконання етапів MCTS, зокрема різні способи модифікації формули UCB1;
2) способи, що орієнтовані на особливості певних типів задач (як правило, ігор);
3) способи, що використовують машинне навчання;
4) способи, що використовують розпаралелення процесу роботи пошуку MCTS.

В деяких дослідженнях першого з цих напрямів [5–7] були зроблені цікаві спостереження. Наприклад, в роботі [6] була досліджена поведінка MCTS щодо форми дерева, яке будується під час виконання пошуку, тобто чи будуть побудовані дерева мати певну форму: чи будуть дерева з більш глибокою формою, чи з більш широкою формою, чи буде дотриманий якийсь баланс між глибиною і шириною дерева. В результаті було встановлено, що форма дерева пошуку MCTS залежить власне від алгоритмічної суті самої прикладної задачі (гри), що навіть невеликі нюанси в постановці задачі (правилах гри та системі підрахунку балів) можуть змінювати форму дерева пошуку, яке буде будуватися в процесі пошуку MCTS. В іншій роботі [7] було відзначено, що якщо параметру C_{UCB1} основної формули (1) пошуку MCTS встановлюють менші значення, то дерево буде будуватися більш глибоким і вузьким, а якщо цьому параметру встановлювати більші значення, то дерево буде будуватися ширшим. Але наразі дослідженням такого напряму приділялося все ще недостатньо уваги, зокрема дослідженням можливості впливати корекцією форми дерева пошуку під час його побудови на ефективність пошуку MCTS.

Пропонована стаття присвячена перевірці та аналізу здатності розробленого авторами раніше в [8] і докладно розглянутого в [9] способу пошуку по дереву методом Монте-Карло за допомогою контролю форми дерева пошуку MCTS-TSC (Monte-Carlo Tree Search with Tree Shape Control) виконувати такий контроль і тим самим підвищувати ефективність пошуку по дереву методом Монте-Карло порівняно зі стандартним способом реалізації цього пошуку MCTS-UCT (Monte-Carlo Tree Search with Upper Confidence bounds applied to Trees) [1].

Головна ідея MCTS-TSC базується на критерії DW (Depth-Width) виду «глибина-ширина» для контролю форми дерева пошуку під час його побудови. Повторимо стисло цю ідею для кращого розуміння подальшого матеріалу. Якщо відомо, якої типової форми (відношення ширини до глибини чи навпаки) відбувається побудова дерева пошуку методом MCTS для певної прикладної задачі (гри), і в певний момент побудови дерева процесом пошуку MCTS ця форма є, наприклад, ширшою, ніж типова форма дерева, то ми можемо спробувати перенастроювати параметри основної формули UCB1 (1) таким чином, щоб подальшу побудову дерева спрямувати в сторону отримання більш

глибокої форми дерева, і навпаки. В результаті, форма дерева MCTS надалі стане більш типовою для цієї гри (задачі) і ефективність пошуку MCTS може покращитися. Запропонована в [9] модифікація формули UCB1 (1), яка дозволяє виконувати зазначений контроль форми дерева пошуку, має такий вигляд

$$UCB1\_TSC = \frac{NodeWins}{NodePlayouts} + 2 * (C_{UCB1} + \boldsymbol{DW}) * \sqrt{2 * \frac{\ln(ParentPlayouts)}{NodePlayouts}} \quad (2)$$

де доданок DW (Depth-Width) є значенням одного з критеріїв виду «глибина-ширина», який власне і вносить потрібні корекції в побудову дерева пошуку.

В роботі [9] були запропоновані і докладно розглянуті два критерії, WDC та DWC, виду DW. Там же показано, що така корекція форми дерева пошуку дійсно дає позитивний ефект щодо підвищення ефективності пошуку у знаходженні кращих рішень.

Метою даної роботи є експериментальне підтвердження здатності способу подальшого розвитку пошуку по дереву методом Монте-Карло, за допомогою контролю форми дерева пошуку MCTS-TSC на основі запропонованих критеріїв WDC та DWC виду «глибина-ширина», керувати формою дерева пошуку MCTS, спрямовуючи процес побудови дерева пошуку до більш широкої чи більш глибокої форми так, щоб вона наближалася до заданої еталонної (бажаної) для даної прикладної задачі (гри) форми.

Апробація та аналіз керування формою дерева пошуку MCTS

Експериментальна перевірка була виконана на грі Connect Four [10], степінь розгалуження якої B=7. Відзначимо декілька важливих для цього дослідження та аналізу фактів, які були встановлені раніше:

1) максимальна кількість ходів гри Connect Four дорівнює 42, оскільки поле гри має розмір 7x6 клітинок, характерною кількістю ходів до завершення гри за приблизно рівної сили гравців є діапазон від 31 до 37 ходів,
2) дерево пошуку гри Connect Four зазвичай має форму, в якій ширина дерева суттєво перевищує глибину для початкових ходів (оскільки її степінь розгалуження B=7), а для наступних ходів, коли кількість варіантів продовження гри, які потрібно дослідити, зменшується, форма побудованого дерева пошуку поступово стає все більш глибокою;
3) чим більшим є заданий бюджет кількості ітерацій пошуку для прийняття рішення про наступний хід, тим більш широкою стає кінцева форма (відношення ширини дерева до його глибини) побудованого дерева пошуку;
4) найбільш важливим для кінцевого виграшу є правильне виконання початкових ходів, коли ширина дерева пошуку все ще суттєво перевищує його глибину, а дійсно найкращі варіанти наступних ходів ще не визначені, тобто гарне дослідження наступних ходів має ключову роль на цьому етапі пошуку;
5) як правило, пошук методом MCTS знаходить краще рішення, якщо на початку пошуку чергового ходу приділяти більше уваги дослідженню нових, ще не досліджених чи мало досліджених гілок дерева, тобто спрямовувати дерево на розширення, а потім приділяти більше уваги варіантам ходів, які вже стали найбільш перспективними;
6) в результаті раніше виконаних досліджень [9] було з'ясовано, що найкращим значенням параметра C_{UCB1} для гри Connect Four є C_{UCB1}= 0.55.

Розглянемо методику проведення експериментів для апробації керування формою дерева пошуку MCTS за допомогою критеріїв виду «глибина-ширина».

Спочатку, при виконанні пошуку стандартним способом MCTS-UCT для гри Connect Four, були конкретизовані значення NW та ND типової форми дерева пошуку у двох випадках:

- для форми кінцевого дерева пошуку, коли найперспективніший наступний хід гри при певному заданому бюджеті максимальної кількості ітерацій пошуку вже визначений;
- для форми поточного дерева пошуку, яку приймає дерево після певної кількості ітерацій пошуку в процесі визначення чергового ходу в межах заданого бюджету.

Для першого випадку значення ширини та глибини побудованого дерева пошуку, тобто його форма, фіксувалися тільки для остаточного дерева після вичерпання всього бюджету кількості ітерацій пошуку.

Для другого випадку весь бюджет ітерацій пошуку був поділений на 10 інтервалів, після кожного з яких зберігалася інформація про поточні значення глибини та ширини вже побудованого на цей момент дерева пошуку.

Із того, що було з'ясовано на цій початковій стадії експериментів, для подальшого аналізу відзначимо наступне:

- при виконанні перших ходів гри і встановленому бюджеті кількості ітерацій 100000, середнім з округленням значенням форми кінцевого дерева пошуку (відношення ширини дерева NW до глибини дерева ND) виявилося значення NW/ND = 4700, а середнім з округленням значенням форми дерева пошуку після виконання половини ітерацій бюджету (50000) виявилося значення NW/ND = 2700;
- при виконанні перших ходів гри і встановленому бюджеті кількості ітерацій 200000, середнім з округленням значенням форми кінцевого дерева пошуку (відношення ширини дерева NW до глибини дерева ND) виявилося значення NW/ND = 7200, а середнім з округленням значенням форми дерева пошуку після виконання половини ітерацій бюджету (100000) виявилося значення NW/ND = 4300;
- при наступному збільшенні встановленого бюджету кількості ітерацій значення NW/ND змінювалися аналогічно для обох випадків, як для кінцевого дерева, так для дерева після половини виконаних ітерацій бюджету.

Враховуючи вищезазначені попередньо визначені факти, основна частина дослідження для підтвердження теоретичного обґрунтування можливості та механізму впливу запропонованих раніше критеріїв форми дерева WDC та DWC [8, 9] була виконана наступним чином:

1. Була виконана множина по 10 партій гри для апробації кожного з критеріїв контролю форми дерева пошуку, WDC та DWC.
2. Всі партії були виконані при встановленому максимальному бюджеті кількості ітерацій повторення пошуку 100000.
3. Для досягнення такого процесу пошуку, як зазначено вище у факті 5), для того, щоб на першій половині ітерацій пошуку критерії контролю форми дерева стимулювали розширення форми дерева, тобто виконання дослідження більшої кількості ходів, а на другій половині ітерацій пошуку навпаки стимулювали поглиблення форми дерева, тобто виконання кращого вибору серед множини вже визначених найбільш перспективних ходів, бажана форма дерева пошуку була встановлена відношенням DFW/DFD = 2700 (DFW – Desired Form Width, DFD – Desired Form Depth), тобто як середнє з округленням значення форми дерева пошуку, яке було отримане після виконання половини ітерацій бюджету (50000) на попередньому етапі дослідження.
4. Згідно із зазначеним вище фактом 6), дослідження виконувалося при встановленому значенні основного параметра $C_{uct} = 0{,}55$ для обох цих гравців в усіх випадках.
5. Значення поточної форми вже побудованого дерева пошуку фіксувалися з кроком 10000 ітерацій, починаючи від 10000 до завершення всього виділеного бюджету 100000 ітерацій при виконанні всіх 10 партій гри, і потім значення форми дерев після однакової кількості виконаних ітерацій пошуку були усереднені.
6. Значення поточної форми вже побудованого дерева пошуку фіксувалися при виконанні перших двох ходів, коли визначення потенційно найкращого ходу є найскладнішим.

Діаграми результатів, виконаних за описаною методикою проведення експериментів, для критерію WDC, при встановленому бюджеті кількості ітерацій пошуку 100000, показані на рис. 1, а для критерію DWC – на рис. 2.

Умовні позначення та кольори на цих рисунках мають таке значення:

- 1_UCT – гравець, який грав за стандартним способом MCTS-UCT, ходив першим;
- 2_TSC – гравець, який грав за способом MCTS-TSC з контролем форми дерева пошуку, ходив другим;
- по осі абсцис відкладалися значення кількості ітерацій пошуку (10000, 20000, …, 100000), після яких визначалася поточна форма вже побудованих на цей момент дерев пошуку обох гравців;
- по осі ординат відкладалося поточне значення форми дерева пошуку NW/ND відповідного гравця, яку мало побудоване дерево пошуку після певної кількості ітерацій

пошуку.

- жовтим фоном виділені менше із значень форми дерева двох гравців, а зеленим фоном – більше із значень форми дерева двох гравців, при однаковій кількості ітерацій;
- червоним кольором виділені значення при кількості ітерацій 50000 і 60000, коли відбувалася зміна взаємовідношення форми дерев MCTS-UCT та MCTS-TSC (було більше значення у гравця 2_TSC, а стало у гравця 1_UCT).

Рис. 1. Діаграма порівняння форми дерев пошуку MCTS-UCT та MCTS-TSC при використанні критерію контролю форми дерева WDC

Рис. 2. Діаграма порівняння форми дерев пошуку MCTS-UCT та MCTS-TSC при використанні критерію контролю форми дерева DWC

Додамо до діаграм на рис. 1 та рис. 2 потрібно зазначити, що у випадку, якщо першим гравцем буде гравець TSC, а другим гравцем – UCT, а також при встановленні інших обчислювальних бюджетів кількості ітерацій пошуку та відповідних їм форм дерева, загальна картина впливу контролю форми дерева пошуку за допомогою критеріїв WDC та DWC не змінюється.

Пам'ятаючи, що при встановленому бюджеті кількості ітерацій пошуку 100000 бажаною (еталонною) формою дерева пошуку було встановлене відношення DPW/DPD = 2700, відзначимо важливі спостереження, які випливають із результатів, показаних на рис. 1 та рис. 2.

Спостереження 1. На початку пошуку, коли дерево тільки починає будуватися, форма дерева

MCTS для гри Connect Four є глибшою, ніж бажана. Тому, критерії керування формою дерева повинні спонукати процес пошуку у сторону більшої кількості досліджень нових ходів, тобто в сторону розширення дерева пошуку. Саме це можна й помітити після виконання кількості ітерацій пошуку від 10000 до 50000, оскільки значення відношення NW/ND у дерева пошуку гравця TSC на цій стадії пошуку завжди перевищує значення гравця UCT. Тобто, на цьому етапі пошуку вплив критеріїв керування формою дерева відповідає очікуваному, а саме, скеровує побудову дерева до більш широкої форми, порівняно з гравцем UCT.

Спостереження 2. Далі можна помітити, що після виконання 50000 ітерацій пошуку значення поточної форми дерева NW/ND (2609,4 для UCT і 2632,1 для TSC на рис. 1 та 2546 для UCT і 2675,5 для TSC на рис. 2 – виділено червоним кольором) вже наближаються до початково встановленого бажаного значення форми DFW/DFD = 2700, але ще не перевищують його. І в цьому випадку також контроль форми дерева пошуку все ще скеровує форму дерева у гравця TSC до більш широкої, ніж у гравця UCT, оскільки все ще має більше значення, ніж у гравця UCT. Але вже після 60000 ітерацій, коли, при постійному зростанні дерева пошуку вширину при його побудові, ширина дерева пошуку обох гравців перевищила встановлене бажане значення форми DFW/DFD = 2700 (3062 для UCT і 3048,7 для TSC на рис. 1 та 3011,7 для UCT і 2880 для TSC на рис. 2 – виділено червоним кольором), форма дерева пошуку гравця TSC отримала вже менше значення, ніж форма гравця UCT, а це значить стала трохи більш глибокою, ніж у гравця UCT. Тобто, – коли форма дерева стала більш широкою, ніж бажана, використання критеріїв керування формою дерева почало скеровувати побудову дерева пошуку до більш глибокої форми, ніж має дерево гравця за стандартною реалізацією пошуку MCTS-UCT. Така поведінка вдосконаленого пошуку MCTS-TSC знову ж таки відповідає теоретичним очікуванням.

Спостереження 3. При подальшій побудові дерев пошуку обох гравців, коли кількість ітерацій пошуку найкращого наступного ходу продовжувала збільшуватися від 70000 до 100000, а форма обох дерев продовжувала зростати вширину (нагадаємо, це загальна властивість дерева пошуку MCTS для гри Connect Four), використання контролю форми дерева пошуку у способі MCTS-TSC продовжувало скеровувати процес побудови дерева гравця TSC до більш глибокої форми, ніж форма побудованого дерева пошуку у гравця UCT, оскільки, як видно з рис. 1 та рис. 2, значення відношення NW/ND у дерева пошуку гравця TSC на цій стадії пошуку завжди є меншим, ніж значення цього відношення у дерева пошуку гравця UCT. Тобто, і на цьому етапі процесу пошуку вплив критеріїв керування формою дерева WDC та DWC відповідає очікуваному, а саме, скеровує побудову дерева вже до більш глибокої, а не широкої, форми.

Висновки

Попередні дослідження визначили, що при застосуванні пошуку MCTS для однієї конкретної гри (прикладної задачі) пошук виконується ефективно, якщо під час пошуку будується дерево пошуку з певним видом форми дерева (наприклад, вузькі і глибокі або навпаки), в той час, як ефективним рішенням інших задач відповідають дерева, які мають форму дерева пошуку з іншим відношенням ширини до глибини.

В цій статті показано, що запропоновані в рамках способу пошуку MCTS-TSC критерії виду DW здатні виконувати контроль та корекцію форми дерева пошуку в процесі його побудови. Спосіб MCTS-TSC може бути використаний, наприклад, якщо завчасно відомо, яка форма дерева пошуку (з яким відношенням ширини до глибини) є типовою для ефективного пошуку кращих ходів для конкретної гри чи прикладної задачі, або такі знання можуть бути отримані за допомогою певного методу машинного навчання. Якщо така інформація може бути отримана для певних задач, то, враховуючи її, з'являються нові можливості для динамічного контролю форми дерева пошуку, що дозволяє скерувати подальший процес побудови дерева в потрібному напрямку і підвищити ефективність пошуку найкращих подальших дій. Проведена апробація та аналіз форми побудованих дерев пошуку показали, що спосіб вдосконалення пошуку по дереву за допомогою контролю форми дерева MCTS-TSC на основі встановлення певних параметрів формули критеріїв виду «глибина-ширина», не змінюючи загального асиметричного принципу побудови дерева пошуку, дозволяє скерувати процес цієї побудови до більш широкої форми дерева або до більш глибокої форми. Отримані результати підтверджують здатність способу MCTS-TSC керувати формою дерева пошуку MCTS за допомогою критеріїв DW виду «глибина-ширина».

Запропонований принцип контролю та управління формою дерев на основі критеріїв виду DW може бути застосований не тільки для пошуку по дереву методом MCTS, а й для довільних інших задач, що вимагають використання деревовидних структур даних, в яких потрібно

контролювати форму дерева під час його побудови.

В якості одного із напрямків подальших досліджень можна запропонувати дослідити застосування контролю форми дерева пошуку не тільки власне до пошуку методом MCTS, а й до інших методів та задач, в яких використовується представлення даних у вигляді дерева і для яких контроль форми дерева може вдосконалити їх розв'язок. Іншим напрямком може бути використання методів машинного навчання для динамічної корекції параметрів у критеріях виду DW.

Список бібліографічного опису

1. Cameron Browne, Edward Powley, Daniel Whitehouse, Simon M. Lucas, Peter I. Cowling, et al., "A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods", *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 4, no. 1, pp. 1–43, March 2012, doi: 10.1109/TCIAIG.2012.2186810.

2. Marcel Kemmerling, Daniel Lütticke, and Robert H. Schmitt, "Beyond games: a systematic review of neural Monte Carlo tree search applications", *Applied Intelligence*, vol. 54, 2024, pp. 1020–1046, doi: 10.1007/s10489-023-05240-w.

3. Jorik Jooken, Pieter Leyman, Tony Wauters, Patrick De Causmaecker, "Exploring search space trees using an adapted version of Monte Carlo tree search for combinatorial optimization problems", *Computers & Operations Research*, ISSN: 0305-0548, vol. 150, 2023, pp. 1–46, doi: 10.1016/j.cor.2022.106070.

4. T. Ou, Y. Lu, X. Wu and J. Cao, "Monte Carlo Tree Search: A Survey of Theories and Applications," *2022 3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, Xi'an, China, 2022, pp. 388-396, doi: 10.1109/ICBAIE56435.2022.9985899.

5. Gareth M. J. Williams, "Determining Game Quality Through UCT Tree Shape Analysis", *MSc. Thesis. Imperial College London*, 2010 [Online]. Available: https://www.doc.ic.ac.uk/teaching/distinguished-projects/2010/g.williams.pdf. Accessed on: Apr 15, 2025.

6. Hilmar Finnsson and Yngvi Björnsson, "Game-Tree Properties and MCTS Performance", *IJCAI 2011: Proceedings of the 2nd International General Game Playing Workshop*, Jan. 2011, pp. 23–30. Available: http://surl.li/hlmyrs. Accessed on: Apr 15, 2025.

7. Joel Veness, Kee Siong Ng, Marcus Hutter, William Uther, and David Silver, "A Monte-Carlo AIXI Approximation", *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 40, no. 1, pp. 95–142, January 2011. Available: https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2016945.2016949. Accessed on: Apr 15, 2025.

8. Oleksandr I. Marchenko and Oleksii O. Marchenko, "Monte-Carlo tree search with tree shape control", *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 812-817, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100358.

9. Марченко О. О., «Подальший розвиток пошуку по дереву методом Монте-Карло зі динамічним контролю форми дерева пошуку», *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 2024, № 56, С.213–219, doi: 10.36910/6775-2524-0560-2024-56-27.

10. Connect Four, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Available: http://surl.li/zhdnfm. Accessed on: Apr 15, 2025.

References

1. Cameron Browne, Edward Powley, Daniel Whitehouse, Simon M. Lucas, Peter I. Cowling, et al., "A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods", *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, vol. 4, no. 1, pp. 1–43, March 2012, doi: 10.1109/TCIAIG.2012.2186810.

2. Marcel Kemmerling, Daniel Lütticke, and Robert H. Schmitt, "Beyond games: a systematic review of neural Monte Carlo tree search applications", *Applied Intelligence*, vol. 54, 2024, pp. 1020–1046, doi: 10.1007/s10489-023-05240-w.

3. Jorik Jooken, Pieter Leyman, Tony Wauters, Patrick De Causmaecker, "Exploring search space trees using an adapted version of Monte Carlo tree search for combinatorial optimization problems", *Computers & Operations Research*, ISSN: 0305-0548, vol. 150, 2023, pp. 1–46, doi: 10.1016/j.cor.2022.106070.

4. T. Ou, Y. Lu, X. Wu and J. Cao, "Monte Carlo Tree Search: A Survey of Theories and Applications," *2022 3rd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, Xi'an, China, 2022, pp. 388-396, doi: 10.1109/ICBAIE56435.2022.9985899.

5. Gareth M. J. Williams, "Determining Game Quality Through UCT Tree Shape Analysis", *MSc. Thesis. Imperial College London*, 2010 [Online]. Available: https://www.doc.ic.ac.uk/teaching/distinguished-projects/2010/g.williams.pdf. Accessed on: Apr 15, 2025.

6. Hilmar Finnsson and Yngvi Björnsson, "Game-Tree Properties and MCTS Performance", *IJCAI 2011: Proceedings of the 2nd International General Game Playing Workshop*, Jan. 2011, pp. 23–30. Available: http://surl.li/hlmyrs. Accessed on: Apr 15, 2025.

7. Joel Veness, Kee Siong Ng, Marcus Hutter, William Uther, and David Silver, "A Monte-Carlo AIXI Approximation", *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 40, no. 1, pp. 95–142, January 2011. Available: https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/2016945.2016949. Accessed on: Apr 15, 2025.

8. Oleksandr I. Marchenko and Oleksii O. Marchenko, "Monte-Carlo tree search with tree shape control", *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 812-817, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100358.

9. Marchenko O. O., «Further development of the Monte Carlo tree search method by controlling the search tree shape», *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, 2024, № 56, pp. 213–219, doi: 10.36910/6775-2524-0560-2024-56-27.

10. Connect Four, *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Available: http://surl.li/zhdnfm. Accessed on: Apr 15, 2025.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-24
УДК 004.02
Марченко Олександр Іванович, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-4537-3420
Марченко Олексій Олександрович, асистент
https://orcid.org/0000-0002-5080-4811
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ЗДАТНОСТІ ЗАСОБІВ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ ГЕНЕРУВАТИ КОД В СТИЛІ СТУДЕНТА І ВИЯВЛЯТИ ТАКИЙ ЗГЕНЕРОВАНИЙ КОД

Марченко О. І., Марченко О. О. Аналіз здатності засобів зі штучним інтелектом генерувати код в стилі студента і виявляти такий згенерований код. Відомо, що засоби зі штучним інтелектом (ЗШІ) можуть генерувати програмний код в різних стилях: загальному стилі, стилях інших ЗШІ, стилі викладача, стилі професійного розробника тощо. Але якщо студент-першокурсник в якості виконання завдання надає код, що був згенерований за допомогою ЗШІ в занадто гарному професійному стилі, то можливість виконання цієї роботи достатньо легко визначити викладачем. В статті вивчається можливість ЗШІ генерувати код в стилі «студента-першокурсника» і здатність ЗШІ виявляти код, що був саме згенерований за допомогою ЗШІ, а не був написаний справжнім студентом-першокурсником. Метою статті є дослідження можливості студента-першокурсника використовувати ЗШІ при написанні програм мовою С за початковими завданнями дисципліни першого курсу навчання. Це дослідження було проведене для того, щоб з'ясувати, чи спроможні студенти успішно використовувати версії трьох ЗШІ, які є широко відомі і використовуються за найбільш використовуваних студентами: ChatGPT, Copilot і Gemini. В результаті дослідження було встановлено, що ЗШІ ChatGPT, Copilot можуть досить добре імітувати свій код під код студента, а ЗШІ Gemini не впорався з цією задачею. В цьому випадку, як стверджує програма, що написана мовою С за початковими завданнями першого курсу навчання. У зв'язку з цим було проведено дослідження та рекомендації викладачам щодо використання досліджених ЗШІ в якості допоміжних засобів навчання. Оскільки потужність ЗШІ розвивається дуже швидко, тому виникає доцільність повторити дослідження приблизно через рік. Ще одним напрямом можна запропонувати провести аналогічне дослідження при використанні інших мов програмування, а також при виконанні завдань більш високої складності.

Ключові слова: засоби зі штучним інтелектом, Copilot, ChatGPT, Gemini, програмування, код, згенерований штучним інтелектом.

Marchenko Oleksandr, Marchenko Oleksii Analysis of the ability of artificial intelligence tools to generate student-style code and detect such generated code. It is known that artificial intelligence tools (AIT) can generate program code in different styles: the general style, the styles of other AITs, the teacher's style, the style of a professional developer, etc. But if a first-year student provides code for a task that was generated using an AIT in some such professional style that the teacher can easily determine the non-independency of performing such work. The article studies the possibility of AITs to generate code in the "first-year student" style and the ability of AITs to determine that this code was generated using an AIT, and was not actually written by a first-year student. The aim of the article is to investigate how easily a first-year student can mask the use of AITs when writing programs in C language for educational tasks in the disciplines of the first-year study. This study was conducted for the code generated in the student's style by the latest free versions of three AITs, which are currently among the most popular and most used by students: ChatGPT, Copilot, and Gemini. As a result of the study, it was found that the AITs ChatGPT, Copilot can mask their code as the student's code quite well, while the AIT Gemini did not cope with this task. In our case, this applies to programs written in C language for tasks of initial complexity of the first year of study. The conclusions summarize the results of the study and make recommendations to teachers regarding the use of the studied AITs. The following are noted as areas for further research. Since the power of AI is developing explosively quickly, it seems appropriate to repeat the research of this article again in a year or two. Another direction can be proposed to conduct a similar study using other programming languages, as well as when performing tasks in other disciplines, and/or of greater complexity.

Keywords: tools with artificial intelligence, Copilot, ChatGPT, Gemini, programming, AI generated code.

Постановка наукової проблеми. З розвитком IT-технологій все більшої популярності набуває створення різноманітних засобів зі штучним інтелектом (ЗШІ), побудованих на основі різних моделей, та використання цими. Широко використовуване ЗШІ почали також і програмісти, застосовуючи їх у якості помічника при розробці програм, а також студенти програмістських спеціальностей при виконанні лабораторних та контрольних робіт, оволодіваючи можливостями таких ЗШІ. В результаті, при поясненні навчального процесу виникла проблема визначення, чи виконав студент завдання самостійно своїм розумом, чи він для виконання цього завдання використав засоби штучного інтелекту, не сильно розуміючи матеріал дисципліни. Відомо, що засоби зі штучним інтелектом можуть генерувати програмний код в різних стилях: загальному стилі (за замовченням), стилях інших ЗШІ, стилі викладача (з детальними поясненнями), стилі професійного розробника (як правило, оптимізований, але менш навчений) тощо. Якщо студент-першокурсник в якості виконання завдання надає код, що був згенерований за допомогою ЗШІ в

якомусь такому професійному стилі, то несамостійність виконання цієї роботи достатньо легко візуально визначається викладачем при перевірці. Але виникає наступне питання: Який код згенерує ЗШІ, якщо студент поставить йому завдання (напише промпт ЗШІ) з проханням написати програму в стилі студента-першокурсника з метою максимально приховати використання ЗШІ для виконання свого завдання?

Проблема нашого дослідження фактично складається з двох частин. 1) визначення можливості генерування коду ЗШІ мовою С, замаскованого під код студента-першокурсника. 2) визначення можливості ідентифікації такого замаскованого коду як коду ЗШІ за допомогою як власне самих ЗШІ, так і викладачами. Такий варіант використання ЗШІ наразі є не мало досліджуваним.

Тому, дослідження можливостей використання студентами різних ЗШІ для виконання навчальних завдань з програмування мовою С таким чином, щоб ускладнити викладачам виявлення факту такого використання, а також можливостей виявлення таких фактів за допомогою ЗШІ викладачами, є актуальною задачею.

Аналіз попередніх досліджень. Серед існуючих робіт є дослідження, які присвячені загальній проблемі генерації якісного коду за допомогою ЗШІ (надалі для скорочення фрази «код, що згенерований за допомогою ЗШІ» будемо використовувати термін «код ЗШІ»), а також дотичним проблемам визначення авторства коду та виявлення коду ЗШІ, але не безпосередньо зазначеному вище варіанту використання ЗШІ студентами. Переважна більшість робіт, які досліджують програмний код ЗШІ, в основному, присвячені проблемам визначення коректності і якості коду ЗШІ для розробки комерційних проєктів, тобто з точки зору максимальної професійності такого коду. Гарними оглядами цього напрямку є, наприклад, [1, 2]. Також багато є робіт, які присвячені визначенню, хто є автором, людина чи ЗШІ, але які спрямовані на визначення авторства загальних текстів, наприклад, [3, 4]. Причому такі розробки базуються здебільшого на тих же підходах, які використовуються в системах виявлення плагіату. Але існуючі системи виявлення плагіату загального текстового типу не дуже добре справляються з виявленням коду ЗШІ. Як зазначається в [5], «університети та навчальні заклади стикаються з новими викликами, пов'язаними з генерацією коду ЗШІ. Традиційні інструменти виявлення плагіату застарівають, вимагаючи більш складних підходів для забезпечення академічної доброчесності» (переклад з англ.). Але такі загальні проблеми, як визначення належності певного коду конкретному автору-людині, а також визначення, чи є певний код плагіатом, не є предметом нашого дослідження.

Розглянемо роботи, які дотичні до другої частини сформульованої вище проблеми нашого дослідження. Такі роботи досліджують можливості виявлення, чи був певний код програм написаний людиною, чи деяким ЗШІ [6-13]. Цікаві роботи з гарними результатами представлені в [6, 7]. В них запропоновані оригінальні підходи для виявлення коду мовою Python, який був згенерований за допомогою ЗШІ, зокрема ChatGPT 4. Наразі мова Python є однією з найбільш популярних в навчальному процесі багатьох університетів та спеціальностей. Але слід зазначити, що коректність виявлення авторства ЗШІ певного програмного коду суттєво залежить від мови програмування, а також від складності алгоритмів цього коду. Крім того, на коректність такого виявлення впливає також те, що різні ЗШІ, як правило, генерують доволі різний код для одного й того ж завдання. Тому, моделі та методи, що налаштовані тільки на мову Python, навряд чи будуть достатньо ефективними для використання викладачами дисциплін, завдання яких вимагають програмування мовою С, що є основною мовою навчання (в тому числі й на першому курсі) в рамках підготовки системних програмістів за спеціальністю «Комп'ютерна інженерія», оскільки вона є стандартом де-факто для розробки програм системного рівня і програмного забезпечення вбудованих систем.

Наразі з'явилося немало ЗШІ, що спеціально налаштовані на виявлення коду ЗШІ, згенерованого різними мовами програмування, в тому числі й мовами С та С++. Вони використовують як комбінації загальновідомих ЗШІ, так і свої власні великі мовні моделі LLM (Large Language Model) [8-11]. Але більшість таких досліджень і розробок моделей та засобів виконуються відносно невеликими компаніями чи групами розробників, ефективність яких не перевірялась незалежними експертами, а, в основному, декларується на рівні самореклами. І тому розроблені цими групами засоби викликають певні сумніви у ефективності виявлення ними коду ЗШІ в програмах, написаних за навчальними завданнями. Як наслідок, перш, ніж використовувати такі засоби у навчальному процесі, потрібно спочатку провести ґрунтовне дослідження їх якості, на що викладачі не мають ні часу, ні ресурсів. І не факт, що такі часомісткі і трудомісткі дослідження

кожного з цих засобів покажуть гарну якість виявлення ними використання ЗШІ студентами і, відповідно, доцільність їх застосування у навчальному процесі. Ще одним фактором, який обмежує використання таких засобів викладачами, є комерціалізація розробниками своїх продуктів після отримання деяких позитивних результатів. Хоча деякі засоби мають безкоштовні версії, як наприклад [9-11], але їх безкоштовні версії, як правило, є досить суттєво обмеженими за кількістю безкоштовних перевірок та/або за рівнем якості перевірок. Більш того, наприклад, автори роботи [12] в результаті свого дослідження взагалі роблять висновок, що всі досліджені ними засоби такого типу погано працюють і не мають достатньої можливості узагальнення для практичного застосування. Хоча, звичайно, цей висновок стосується не всіх ЗШІ такого типу, а тільки тих, які дослідили ці автори, але він є достатньо показовим.

В рамках магістерської дисертації [13], науковим керівником якої був один із авторів цієї статті, був запропонований інший підхід до вирішення проблеми виявлення коду ЗШІ. Цей підхід полягає у тому, щоб замість розробки своєї власної моделі (яка навряд чи в найближчому майбутньому перевершить потужність моделей провідних компаній) використовувати для виявлення коду ЗШІ власне ЗШІ, що розроблені провідними компаніями світу, які вже самі по собі є готовим потужним інструментом на основі генеративних мовних моделей. Було запропоновано спосіб виявлення коду ЗШІ за допомогою виконання діалогів з різними ЗШІ за певним сценарієм. Об'єднання «думки» декількох ЗШІ, отриманої за такими діалогами, може давати висновок про походження певного коду. Таке початкове дослідження показало позитивні результати і потенційну можливість застосування такого підходу.

Підхід з використанням найбільших загальнодоступних ЗШІ для виявлення коду ЗШІ має наступні переваги для викладачів перед використанням складних спеціалізованих систем перевірки на авторство ЗШІ, що розроблені окремими компаніями чи розробниками:

1) викладач має змогу використовувати такі ЗШІ для перевірки студентських робіт у будь-якому місці на будь-якому комп'ютері, і навіть на телефоні, що дуже важливо в умовах дистанційного навчання і військового стану;

2) ці ЗШІ є надійно доступними у будь-який час, оскільки підтримуються провідними світовими компаніями;

3) все потужніші оновлення цих ЗШІ з'являються останнім часом кожних кілька місяців, що, як правило, не під силу невеликим командам спеціалізованих систем;

4) ці ЗШІ мають потужні безкоштовні версії, які потенційно здатні виявляти використання коду ЗШІ у роботах студентів, що також є важливим для викладачів.

Таким чином, якщо дослідити і визначити певні сценарії діалогу із загальнодоступними ЗШІ, який дозволить за допомогою їх потужного інтелекту виявляти використання коду цих же чи інших ЗШІ в роботах студентів, і написати чат-бот, який буде виконувати діалог з цими ЗШІ за таким сценарієм, то викладачі отримали б зручний інструмент для використання у навчальному процесі.

Метою цієї статті є дослідження, наскільки легко засоби зі штучним інтелектом можуть генерувати код мовою С за навчальними завданнями дисциплін першого курсу в стилі, ніби цей код написав студент-першокурсник, а також наскільки легко викладачам виявити такі факти як візуально, так і за допомогою використання засобів зі штучним інтелектом.

Засоби зі штучним інтелектом, використані у дослідженні

Експериментальна частина дослідження складалася з двох етапів (докладно ці етапи описані у розділі методики дослідження): етапу генерації коду за певними завданнями за допомогою обраних ЗШІ та етапу оцінювання, чи цей код був написаний студентом, чи був згенерований за допомогою ЗШІ. Оцінювання виконувалося як множиною ЗШІ, так і декількома викладачами.

Спочатку розглянемо ЗШІ, які були використані на етапі генерації коду в стилі студента-першокурсника.

Оскільки студенти-першокурсники, як правило, ще не використовують платних підписок на більш потужні версії ЗШІ, то генерація коду для цього дослідження була виконана за допомогою останніх на момент виконання дослідження (травень 2025 року) безкоштовних версій трьох ЗШІ, які доступні для використання відразу при відкритті вікон діалогу з ними:

1) Copilot від Microsoft;
2) ChatGPT від OpenAI, модель GPT-4-turbo;
3) Gemini 2.5 Pro (preview) (Міркування, математика й програмування) від Google.

Ці ЗШІ є наразі одними з найпопулярніших та найбільш використаними серед студентів першого курсу тому, що вони є безкоштовними, і тому, що ChatGPT є найпершим і найвідомішим ЗШІ, а Copilot та Gemini є інтегрованими ЗШІ у найбільш широко використані продукти компаній Microsoft та Google

Точну версію Copilot визначити не вдалося. Відомо, що Copilot – це спільна розробка Microsoft і OpenAI, в основі якої лежить GPT, але точний номер не зазначається. Сам Copilot на питання «яку версію GPT ти використовуєш?» відповів наступне: «Я розумію вашу цікавість! Я створений на основі найновіших передових моделей великих мовних моделей, розроблених Microsoft. На жаль, я не можу розголошувати конкретні технічні деталі щодо версії моделі, на якій я базуюсь. Якщо у вас є інші питання або хочете обговорити щось цікаве, я завжди тут, щоб допомогти!».

Хоча питання до ChatGPT про його версію було задане без входу в акаунт, він на це питання відповів так: «Наразі ти спілкуєшся з моделлю GPT-4, точніше – з її варіантом, відомим як GPT-4-turbo. Це вдосконалена версія GPT-4, яка працює швидше й ефективніше, і саме вона використовується у ChatGPT для користувачів з підпискою ChatGPT Plus».

Gemini має меню з вибором версії моделі. На запит, яку з цих версій він вважає найдошлыпшою для виявлення коду ЗШІ, ЗШІ Gemini очікувано відповів, що рекомендує «Gemini 2.5 Pro (preview) як потенційно найпридатнішу безкоштовну модель Gemini для спроби виявлення коду С, згенерованого штучним інтелектом». Щоправда, виявилося, що модель ЗШІ Gemini 2.5 Pro (preview) має трохи обмежену безкоштовність – через певну кількість запитів цей ЗШІ пропонує або зробити платну підписку, або зробити паузу на декілька годин. Така обмеженість не є критичною для використання студентами, але може внести певні незручності викладачам при перевірці великої кількості студентських робіт.

Зауважимо також, що ЗШІ DeepSeek китайських розробників було вирішено не використовувати у дослідженні із-за великої кількості публікацій в інтернеті щодо його не повної безпечності з точки зору кібербезпеки. І тому його наразі було б недоцільно рекомендувати викладачам для користування.

Тепер розглянемо ЗШІ, які були використані в якості експертів на етапі оцінювання коду, що був згенерований коду за допомогою в стилі студента-першокурсника на першому етапі.

Забігаючи трохи наперед, зазначимо, що на цьому етапі в якості експертів-оцінювачів згенерованого коду ЗШІ виступали три категорії експертів: 1) ті ж самі три ЗШІ, які генерували код, 2) два ЗШІ від компаній, які надають послуги з аналізу коду та тексту за допомогою використання генеративного ШІ, і мають частково безкоштовні версії; 3) викладачі з програмування

Оскільки виявляти факти використання коду ЗШІ потрібно викладачам, а більшість викладачів, як правило, наразі не використовують ЗШІ з платними підписками, а в основному безкоштовні популярні моделі, то трьома першими ЗШІ в якості експертів були обрані ті ж самі ЗШІ, що використовувалися й для генерації цього коду. Крім того, використання тих же ЗШІ створювало цікаву для аналізу ситуацію типу «перехресного оцінювання» цих ЗШІ.

Із множини засобів аналізу коду від компаній, які надають послуги на основі власних інтеграторів моделей генеративного ШІ (тобто також належать до категорії ЗШІ), були обрані два засоби, що, окрім платних версій, мають також і безкоштовні (але обмежені) версії:

1) You.com [10];
2) YesChatAI Code Detector [11].

ЗШІ You.com на запит, яку модель він використовує, відповів, що це мовна модель GPT-4o від компанії OpenAI. Оскільки модель GPT-4o є більш потужною, ніж модель, яка наразі використовується в якості безкоштовної у ChatGPT (GPT-4-turbo), то цей ЗШІ був обраний для оцінювання коду ЗШІ, згенерованого на попередньому етапі.

На інтернет сторінці YesChatAI написано, що цей ЗШІ інтегрує можливості DeepSeek-R1, GPT-o1, GPT-4o, Claude3.5 Sonnet, and Claude3 Opus. На запит, яка модель використовується в якості безкоштовної версії, цей ЗШІ відповів, що, в основному використовується GPT-4-turbo, хоча може підключатися й модель GPT-4o. Тобто, теоретично навіть безкоштовна версія YesChatAI може бути більш потужною, ніж поточна безкоштовна версія ChatGPT.

Але використання безкоштовних версій ЗШІ You.com та YesChatAI має серйозне обмеження: вони дозволяють зробити безкоштовно тільки декілька запитів. Наприклад, щоб виконати наше дослідження (яке є не дуже великим з точки зору кількості запитів) повністю на їхніх безкоштовних версіях, довелося використати по три різних акаунти. Тому, на практиці, викладачі він навряд чи

зможуть активно використовувати ці ЗШІ для перевірки великої кількості студентських робіт.

Крім цих п'яти ЗШІ, згенерований код також оцінювався чотирма викладачами, які мають досвід прийому у студентів лабораторних робіт саме за такими завданнями, на які ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini згенерували код.

Завдання дослідження

1. Розробити методику дослідження.

2. Підібрати завдання з програмування мовою С, які виконують студенти-першокурсники в першому семестрі навчання.

3. На першому етапі дослідження згенерувати для кожного з них завдань за допомогою трьох ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini код в стилі студента-першокурсника, сформулювавши спеціальний запит до них від імені студента на генерацію саме такого коду.

4. На другому етапі дослідження сформулювати спеціальний запит до ЗШІ від імені викладача з проханням перевірити множину написаних мовою С програм, чи були вони згенеровані за допомогою ЗШІ, і надати результати такої перевірки за однаковою системою оцінювання. Після цього виконати діалоги з певними ЗШІ і отримати від них оцінки коду, що був згенерований за допомогою трьох ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini.

5. Надати код, що був згенерований за допомогою трьох ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini, викладачам і отримати від них оцінки цього коду за такою ж самою системою оцінювання.

6. Систематизувати отримані відповіді та результати їх оцінювання у вигляді таблиці.

7. Виконати аналіз отриманих результатів.

8. Зробити висновки проведеного дослідження.

Методика дослідження

І. Етап генерування коду програм в стилі студента-першокурсника за допомогою трьох ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini.

1. Для генерування коду програм за допомогою ЗШІ було підготовлено 5 завдань на розгалужені алгоритми, циклічні алгоритми та на лінійний пошук у матриці. Такі завдання при навчанні студенти виконують мовою С у першому семестрі першого курсу навчання.

2. Ці 5 завдань були надані трьом ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini з проханням згенерувати для них код в стилі студента-першокурсника.

Запит на таке генерування був наступним:

«Добрий день! Я студент першого курсу ІТ спеціальності. Я хотів би дуже попросити тебе виконати декілька завдань з програмування мовою С в такому стилі, як міг би його виконати саме такий студент як я, а не досвідчений розробник.

Дуже важливо, щоб викладач повірив, що цей код написав я, а не чатбот зі штучним інтелектом. :). Дуже прошу!».

ІІ. Етап оцінювання здатності різних ЗШІ імітувати свій згенерований код під стиль студента-першокурсника.

1. На цьому етапі було виконане оцінювання коду всіх програм, що були згенеровані усіма трьома ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini, усього 5 завдань * 3 ЗШІ = 15 програм, з точки зору, чи цей код був написаний студентом, чи був згенерований за допомогою ЗШІ.

2. Оцінювання виконувалося трьома категоріями експертів:

1) ті ж самі три ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini, які генерували код у стилі студента;
2) два засоби від компаній, які надають послуги з аналізу коду та тексту за допомогою використання генеративного ШІ, і мають частково безкоштовні версії;
3) чотири викладачі з програмування.

3. Експертам перших двох категорій, тобто засобам зі штучним інтелектом, завдання на оцінювання було сформульоване від імені викладача у вигляді двох послідовних запитів.

4. Перший запит був з таким текстом:

«Добрий день! Я викладач університету і викладаю дисципліну "Програмування мовою С" на першому курсі навчання ІТ спеціальності, тобто для студентів-початківців у програмуванні.

Я дуже хотів би попросити тебе допомогти мені з визначенням, чи користуються мої студенти чатботами зі штучним інтелектом для виконання моїх завдань.

Для кожної із наданих програм, оціни, будь-ласка, чи був цей код згенерований чатботом зі штучним інтелектом, чи написаний студентом, за такою системою оцінювання (-2, -1, 0, 11, 12):

-2 – цей код студент однозначно написав сам;

-1 – схоже, що цей код студент скорше написав сам;

0 – імовірність того, що студент написав цей код самостійно, і того, що цей код був згенерований чатботом зі штучним інтелектом, є приблизно однаковими;

+1 – схоже, що цей код скоріше був згенерований чатботом зі штучним інтелектом;

+2 – цей код однозначно був згенерований чатботом зі штучним інтелектом.

Якщо ти визначиш, що код був згенерований чатботом, то також була б дуже цікавою твоя думка щодо того, який саме чатбот зі штучним інтелектом міг згенерувати такий код. Тобто, у випадках, коли ти поставив оцінки +1 або +2, скажи, будь-ласка, який саме чатбот, на твою думку, міг згенерувати цей код.

Зможеш допомогти?».

5. Після підтвердження зі сторони ЗШІ готовності допомогти, їм надсилався другий запит з таким текстом:

«У студентів було 5 завдань: Завдання 1.1, Завдання 1.2, Завдання 2.1, Завдання 2.2, Завдання 3.

Ці завдання виконували три студенти, я дав їм імена Студент 1, Студент 2, Студент 3.

За результатами оцінювання зроби, будь-ласка таблицю виду:

	Завдання 1.1	Завдання 1.2	Завдання 2.1	Завдання 2.2	Завдання 3
Студент 1					
Студент 2					
Студент 3					

Зараз я буду надсилати тобі мої завдання і код студентів на ці завдання.»

6. Після підтвердження зі сторони ЗШІ готовності приймати код програм, їм надсилався код всіх 15 програм, що були згенеровані за допомогою ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini.

7. В якості експертів третьої категорії погодилися виступити чотири викладачі. Їм був переданий код усіх 15 згенерованих програм з проханням оцінити його за тією ж системою оцінювання (-2, -1, 0, +1, +2), за якою оцінювали цей код експерти перших двох категорій.

Результати дослідження

Усі отримані оцінки від усіх експертів були зібрані і систематизовані у вигляді Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати оцінювання здатності ЗШІ маскувати згенерований код під код студента-першокурсника

ЗШІ, який [illegible]	Експерти, які оцінювали код ЗШІ	Код програми Завдання 1.1	Код програми Завдання 1.2	Код програми Завдання 2.1	Код програми Завдання 2.2	Код програми Завдання 3	Середня оцінка (від -2 до +2)	Середня оцінка за категорією експертів: ЗШІ та Викладачі	Середня оцінка всіх експертів	[illegible]	[illegible]
ChatGPT	ChatGPT	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	-0,4 -20%	-0,467 23,3%	0 0%	-0,275 13,75%
	Copilot	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Gemini	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	-0,55 27,5%		-0,55 27,5%	
	Викладач 2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1				
	Викладач 4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
Copilot	ChatGPT	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]
	Copilot	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Gemini	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0,8 [illegible]		0,8 [illegible]	
	Викладач 2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1				
	Викладач 3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
Gemini	ChatGPT	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]	[illegible] [illegible]
	Copilot	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Gemini	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	[illegible]	1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 1	2	2	2	2	2	2	1,8 90%		1,8 90%	
	Викладач 2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]				
	Викладач 4	2	2	2	2	2	2				

В цій таблиці клітинки останніх чотирьох колонок містять по два значення:

- чорним кольором записане відповідне до заголовку колонки середнє значення оцінки;
- червоним кольором виділене відсоткове значення зсуву цієї середньої оцінки у від'ємну сторону (сторону подібності до коду студента) чи додатну сторону (сторону подібності до коду ЗШІ) відповідно за шкалою в діапазоні -2 ÷ 0 (для від'ємних оцінок) або в діапазоні 0 ÷ 2 (для додатних оцінок).

Наприклад, значення 195% для середньої оцінки 1.9 викладачів коду ЗШІ Gemini за шкалою 0 ÷ 2 було отримане за такою формулою: 1.9 / 2 * 100%.

Аналіз результатів дослідження

Проаналізуємо отримані результати з точки зору здатності ЗШІ ChatGPT, Copilot та Gemini маскувати свій згенерований код під стиль студента-першокурсника.

Одразу зазначимо важливий момент щодо оцінок такої здатності, які виставив ЗШІ Copilot. Його оцінки явно виділяються серед оцінок інших ЗШІ, оскільки він виставив коду абсолютно всіх програм, згенерованих усіма ЗШІ (навіть, включно зі своїм власним кодом), однакову максимально від'ємну оцінку -2. Це означає, що цей ЗШІ вважає абсолютно всі надані йому для оцінювання програми однозначно написаними студентами, тобто не знайшов в них жодних ознак генерації штучним інтелектом. Таке оцінювання навряд чи можна пояснити слабістю інтелекту ЗШІ Copilot. Швидше це просто «небажання» оцінювати код на генерацію засобами штучного інтелекту внаслідок вбудованої у нього «політики» розробників щодо надання відповідей на такого роду питання. Тому, на наш погляд, більш доцільно аналізувати оцінювання згенерованого різними ЗШІ коду без врахування у загальній статистиці цих аномальних оцінок, які виставив ЗШІ Copilot, тобто із підсумовуючих колонок таблиці будемо аналізувати дві останніх, в яких є позначка «(без Copilot)».

Аналіз коду, згенерованого за допомогою ЗШІ ChatGPT

Сам ЗШІ ChatGPT оцінив свій же код трьох з п'яти програм як код студента, причому одну програму як однозначно написану студентом. І тільки одну з п'яти програм запідозрив у генерації штучним інтелектом. Його середня оцінка свого ж коду дорівнює -0,6 на користь студента.

ЗШІ Gemini не зміг визначитися з авторством коду чотирьох програм (оцінка 0) і тільки одну визначив як швидше написану студентом. Його середня оцінка коду дорівнює -0,2 на користь студента.

Тобто, стандартні версії популярних ЗШІ (ChatGPT і Gemini, не кажучи вже про Copilot) схилилися до того, щоб вважати код, що був згенерований ЗШІ ChatGPT, кодом студента.

ЗШІ You.com, безкоштовна версія якого базується на використанні моделі GPT-4o, дав оцінки, які суттєво відрізняються від оцінок самого ChatGPT і є більш точними. Це означає, що ця модель, яка доступна в ChatGPT за підпискою, краще виявляє код ЗШІ, ніж доступна наразі в ChatGPT в якості безкоштовної модель GPT-4-turbo. Оцінки You.com є значно ближчими до правди, оскільки він оцінив надані йому програми із середньою оцінкою −0.8 на користь генерації штучним інтелектом.

ЗШІ YesChatAI, безкоштовна версія якого базується на використанні стандартної моделі GPT-4-turbo з можливим підключенням моделі GPT-4o, дав посередині за точністю оцінки між оригінальним ЗШІ ChatGPT і ЗШІ You.com, що якраз відповідає заявленій схемі використання моделей GPT. Цей ЗШІ оцінив код двох програм схожим на роботи студента і код інших двох програм схожим на код ЗШІ. Його результуюча середня оцінка дорівнює 0.

На відміну від оцінок оригінальних ЗШІ ChatGPT і Gemini, які обоє виставили середні оцінки у від'ємному діапазоні схожості на код студента, жоден із ЗШІ інтеграторів мовних моделей You.com і YesChatAI не дав середню оцінку наданому коду, що він схожий на код студента. У YesChatAI вийшла невизначена нульова середня оцінка, а у You.com вийшла середня оцінка з діапазону схожості на код ЗШІ. Тобто, інтегровані ЗШІ компаній, що надають послуги з аналізу коду, зробили більш точне оцінювання, хоча й воно було також досить далеким від правди. Але ще раз звертаємо увагу на те, що ці ЗШІ дозволяють зробити безкоштовно тільки декілька запитів і тому, на практиці, викладачі він навряд чи зможуть їх активно використовувати.

Перейдемо до аналізу оцінок викладачів.

Відразу зазначимо, що оцінювання викладачами наданого коду на схожість з кодом студента чи з кодом ЗШІ є суб'єктивним і сильно залежить як від їх загального досвіду, так і досвіду роботи саме з такими завданнями, а також від чисто людського рівня довірливості. Оцінки Викладача 1 значно відрізняються від оцінок інших викладачів в сторону висновку, що код цих програм був згенерований за допомогою ЗШІ. У Викладача 1 немає жодної від'ємної оцінки схожості наданого

коду на код студента, в той час, як у всіх інших викладачів немає жодної додатної оцінки схожості наданого коду на код ЗШІ. Причому у двох викладачів, Викладача 3 і Викладача 4 немає навіть нейтральних нульових оцінок. Викладач 1 дав майже таку ж за коректністю оцінку схожості наданого коду на код ЗШІ (+0,6), що й ЗШІ You.com (+0,8), тобто одну з двох найбільш точних. Таке оцінювання Викладача 1 може бути наслідком того, що цей викладач є найбільш досвідченим серед усіх викладачів, хто приймав участь в оцінюванні, а також постійно працює з першокурсниками і такими завданнями більше 30 років. Викладач 2 оцінив надані програми приблизно так само (-0,4), як і ЗШІ ChatGPT (-0,6) та Gemini (-0,2), тобто з невеликим відхиленням на користь схожості з кодом студента. Щодо Викладача 3 (середня оцінка = -1) і Викладача 4 (середня оцінка = -1,4), то можна сказати, що засобу зі штучним інтелектом ChatGPT майже вдалося їх переконати, що його код написав студент.

Підведемо підсумки аналізу коду, згенерованого за допомогою ЗШІ ChatGPT, за двома останніми колонками Таблиці 1.

1. Середня оцінка всіх ЗШІ (без Copilot) дорівнює нулю. Тобто, в середньому ЗШІ взагалі не змогли визначитися з походженням коду, який був згенерований за допомогою ЗШІ ChatGPT.
2. Середня оцінка всіх викладачів (завдяки вкладу Викладачів 3 та 4) виявилася достатньо великою на користь студента і дорівнює -0,55. Або ж це складає -27,5% зсуву цієї оцінки у від'ємну сторону (сторону самостійності студента) в діапазоні шкали -2 ÷ 0.
3. Загальна середня оцінка усіх програм усіма експертами (без Copilot) дорівнює -0,275, що у відсотках зсуву цієї оцінки у від'ємну сторону (сторону самостійності студента) за шкалою -2 ÷ 0 складає -13,75%.

Аналіз коду, згенерованого за допомогою ЗШІ Copilot.

Загальна картина оцінювання коду ЗШІ Copilot виявилася схожою на картину оцінювання коду ЗШІ ChatGPT, але з невеликим зсувом середніх оцінок кожного з експертів в ту чи іншу сторону.

ЗШІ ChatGPT, Gemini і You.com, виступаючи в ролі експертів, дали середні оцінки коду ЗШІ Copilot із зсувом у додатну сторону, тобто оцінили його як трохи більш схожий на код штучного інтелекту, ніж вони оцінювали код ЗШІ ChatGPT. Що цікаво, Викладач 1 також дав середню оцінку із зсувом у ту саму сторону. В той час, як ЗШІ YesChatAI і всі інші викладачі оцінили код ЗШІ Copilot як більш схожий на код студента, ніж код ЗШІ ChatGPT.

Підведемо підсумки аналізу коду, згенерованого за допомогою ЗШІ Copilot, за двома останніми колонками Таблиці 1:

1. Середня оцінка всіх ЗШІ (без Copilot) не сильно відрізняється від нуля (+0,1). Тобто, в середньому ЗШІ знову майже не змогли визначитися також і з походженням коду, який був згенерований за допомогою ЗШІ Copilot, хоча сумарно й оцінили його як мінімально схожий на код ЗШІ.
2. Середня оцінка всіх викладачів виявилася ще більшою на користь студента, ніж була у ЗШІ ChatGPT, і дорівнює -0,8. Або ж це складає -40% зсуву цієї оцінки у від'ємну сторону (сторону самостійності студента) в діапазоні шкали -2 ÷ 0. Тобто, ЗШІ Copilot своїм згенерованим кодом зумів ввести в оману більшість викладачів.
3. Загальна середня оцінка усіх програм усіма експертами (без Copilot) дорівнює -0,35, що у відсотках зсуву цієї оцінки у від'ємну сторону (сторону самостійності студента) за шкалою -2 ÷ 0 складає -17,5%.

Аналіз коду, згенерованого за допомогою ЗШІ Gemini.

Код, що був згенерований за допомогою ЗШІ Gemini, незважаючи на прохання написати в стилі студента, виявився зовсім не схожим на код студента. В ньому було дуже багато коментарів з текстом, який студенти навряд чи написали б. Тому й оцінки цього коду були зовсім іншими, ніж оцінки коду ЗШІ ChatGPT та Copilot.

Жоден із ЗШІ як експерт не дав жодної від'ємної оцінки коду ЗШІ Gemini. ЗШІ YesChatAI дав однозначну відповідь (всі оцінки дорівнюють −2) на всі програми, що їх код є згенерованим. Сам Gemini досить легко визначив згенерованість свого власного коду в усіх випадках (середня оцінка 11,8). ЗШІ ChatGPT також достатньо впевнено визначив штучність коду ЗШІ Gemini (середня оцінка 11,4). Але найдивнішою виявилась оцінка ЗШІ You.com (середня оцінка 10,6), який оцінив цей явно згенерований код як більш «студентський», ніж він раніше оцінював код, що був згенерований за допомогою ЗШІ ChatGPT (середня оцінка −0,8) і Copilot (середня оцінка +1,2).

Викладачі взагалі виявили завидну одностайність в оцінюванні коду ЗШІ Gemini. З усіх оцінок усіх викладачів коду усіх програм є тільки дві мінімальні додатні оцінки +1, а всі інші оцінки дорівнюють +2. Тобто, викладачі одностайно і безсумнівно визначили код ЗШІ Gemini як код, що був згенерований засобом зі штучним інтелектом.

Підведемо підсумки аналізу коду, згенерованого за допомогою ЗШІ Gemini, за двома останніми колонками Таблиці 1:

1. Середня оцінка всіх ЗШІ (без Copilot) достатньо однозначно визначає код ЗШІ Gemini, як код штучного интелекту (−1.45). Або ж це складає +72.5% зсуву цієї оцінки у додатну сторону (сторону коду ЗШІ) в діапазоні шкали 0 ÷ 2. Тобто, ЗШІ Gemini своїм згенерованим кодом не зумів ввести в оману інші ЗШІ, що виступали в ролі експертів.
2. Середня оцінка всіх викладачів виявилася взагалі майже максимально додатною і дорівнює +1.9. Або ж це складає +95% зсуву цієї оцінки у додатну сторону (сторону коду ЗШІ) в діапазоні шкали 0 ÷ 2. Тобто, викладачі не повірили коду ЗШІ Gemini зовсім.
3. Загальна середня оцінка усіх програм усіма експертами (без Copilot) дорівнює 1.675, що у відсотках зсуву цієї оцінки у додатну сторону (сторону коду ЗШІ) за шкалою 0 ÷ 2 складає +83.75%.

Висновки

1. ЗШІ Gemini взагалі не зміг замаскувати свій код під студента-першокурсника. Видається, що викладачу буде неважко обґрунтувати свою думку, чому він вважає, що код, згенерований ЗШІ Gemini, є кодом ЗШІ.

2. Найкраще маскує свій код під студента-першокурсника ЗШІ Copilot. Єдиною ознакою, за якою досвідчений викладач може ідентифікувати цей код як код ЗШІ, є текст тих небагатьох коментарів, які вставив ЗШІ Copilot в код програми. Текст цих коментарів записаний фразами, які є не зовсім характерними для сучасних студентів. Якщо в коді, що згенерував ЗШІ Copilot, студент переформулює коментарі по своєму, або навіть просто видалить всі коментарі, або якщо сам Copilot згенерує код взагалі без коментарів, то цей код не буде мати явних ознак відмінності від коду, який, як правило, пишуть студенти-першокурсники. Але проблема полягає в тому, що формально, навіть з такими коментарями, викладач не має однозначних доводів, щоб стверджувати, що цей код був згенерований за допомогою ЗШІ.

3. ЗШІ ChatGPT також добре маскує свій код під студента-першокурсника, але в середньому все ж таки трохи гірше, ніж Copilot.

4. Навіть, якщо студент-першокурсник згенерує код за допомогою ЗШІ Copilot або ChatGPT, а викладач зуміє ідентифікувати цей код як код ЗШІ, то однаково викладачу буде важко обґрунтувати студенту свою думку, чому він вважає, що цей код є кодом ЗШІ, якщо студент буде наполягати, що він сам написав цей код. І якщо викладач не буде приймати у студентів такі роботи або знижувати оцінку, то це може призвести до конфліктних ситуацій зі студентами, оскільки достатньо доказові ознаки коду ЗШІ в цих програмах відсутні.

5. ЗШІ Copilot, коли виступав в якості експерта, оцінював код на можливість його генерування за допомогою ЗШІ якось аномально і не виявив вміння виявляти такий код. Можливо така його поведінка витікає навіть з політики компанії-розробника. Тому, навряд чи можна рекомендувати викладачам використання ЗШІ Copilot з метою виявлення коду ЗШІ. Хоча це дуже прикро, бо ЗШІ Copilot є необмежено безкоштовним у браузері Edge.

6. Із широкодоступних потужних ЗШІ найбільш точну інформацію, чи є певний код кодом ЗШІ, надає ЗШІ Gemini. Він також надає детальні і достатньо аргументовані пояснення, чому цей код є кодом ЗШІ. Тому, ЗШІ Gemini можна рекомендувати викладачам як помічника у виявленні коду ЗШІ в роботах студентів. Але зазначена в розділі опису використаних в дослідженні ЗШІ обмежена безкоштовність ЗШІ Gemini, відповідно, обмежує й можливості його використання викладачами для перевірки великої кількості студентських програм. Хоча це обмеження є не дуже критичним, якщо часу на перевірку є достатньо багато.

7. ЗШІ ChatGPT, хоча й уникає однозначних оцінок щодо наданого йому коду, але також надає достатньо непогану пояснюючу інформацію щодо властивостей цього коду, яку викладач може використати при оцінюванні робіт студентів. Перевагою ЗШІ ChatGPT є його необмежена безкоштовність, що є дуже важливим фактором для викладачів при перевірці великої кількості робіт.

8. Спеціальні засоби штучного інтелекту від інших компаній, такі як ЗШІ You.com та YesChatAI достатньо непогано виявляють код ЗШІ. Але вони є фактично непридатними для використання викладачами з метою виявлення коду ЗШІ, оскільки надають дуже невелику кількість

безкоштовних запитів для того, щоб ці засоби можна було в реальній практиці використовувати для перевірки великої кількості студентських робіт.

9. Суб'єктивізм викладачів в оцінюванні коду на ознаки коду ЗШІ виявився достатньо великим, в залежності від досвіду роботи з першокурсниками і особистої довірливості викладача. Але тут потрібно зауважити, що значна різниця в оцінюванні коду ЗШІ виявилася тільки у випадку достатньо непогано замаскованого під студента коду ЗШІ ChatGPT і особливо ЗШІ Copilot. А якщо код ЗШІ Gemini має явні ознаки генерації штучним інтелектом, то всі викладачі без проблем виявили штучність створення цього коду і оцінили його однаково.

В якості напрямків подальших досліджень можна запропонувати наступне. Оскільки потужність ЗШІ розвивається вибухово швидко, то виглядає доцільним повторити дослідження цієї статті ще раз через рік-два. Ще одним напрямком можна запропонувати провести аналогічне дослідження при використанні інших мов програмування, а також при виконанні завдань з інших дисциплін та/або більшої складності.

Список бібліографічного опису:

1. Dayu Yang, Tianyang Liu, Daoan Zhang, Antoine Simoulin, Xiaoyi Liu, Yuwei Cao, Zhaopu Teng, Xin Qian, Grey Yang, Jiebo Luo, and Julian McAuley, "Code to Think, Think to Code: A Survey on Code-Enhanced Reasoning and Reasoning-Driven Code Intelligence in LLMs", *arXiv:2502.19411v1 [cs.CL] 26 Feb 2025*. Available: https://arxiv.org/html/2502.19411v1. Accessed on: May 15, 2025.
2. Juyong Jiang, Fan Wang, Jiasi Shen, Sungju Kim, and Sunghun Kim, "A Survey on Large Language Models for Code Generation", *arXiv:2406.00515v2 [cs.CL] 10 Nov 2024*. Available: https://arxiv.org/pdf/2406.00515. Accessed on: May 15, 2025.
3. Janek Bevendorff, Matti Wiegmann, Jussi Karlgren, Luise Dürlich, Evangelia Gogoulou, Aarne Talman, Efstathios Stamatatos, Martin Potthast, and Benno Stein, "Overview of the "Voight-Kampff" Generative AI Authorship Verification Task at PAN and ELOQUENT 2024", *Working Notes of the Conference and Labs of the Evaluation Forum (CLEF 2024)*, Grenoble, France, 9-12 September, 2024, pp. 2486-2506. Available: https://ceur-ws.org/Vol-3740/paper-225.pdf. Accessed on: May 15, 2025.
4. Jijie Huang, Yang Chen, Man Luo, and Yonglan Li, "Generative AI Authorship Verification Of Tri-Sentence Analysis Base On The Bert Model", *Working Notes of the Conference and Labs of the Evaluation Forum (CLEF 2024)*, Grenoble, France, 9-12 September, 2024, pp. 2632-2637. Available: https://ceur-ws.org/Vol-3740/paper-243.pdf. Accessed on: May 15, 2025.
5. Xuan Ji, "Detecting ai-generated code in C++: A comprehensive guide", BytePlus, Apr 25, 2025. Available: https://www.byteplus.com/en/topic/500341?title=detecting-ai-generated-code-in-c-a-comprehensive-guide. Accessed on: May 15, 2025.
6. Oseremen Joy Idialu, Noble Saji Mathews, Rungroj Maipradit, Joanne M. Atlee, and Mei Nagappan, "Whodunit: Classifying Code as Human Authored or GPT-4 Generated - A case study on CodeChef problems", *MSR '24: Proceedings of the 21st International Conference on Mining Software Repositories*, 2024, pp. 394 – 406. Available: https://doi.org/10.1145/3643991.3644926. Accessed on: May 15, 2025.
7. David Álvarez-Fidalgo and Francisco Ortin, "CLAVE: A deep learning model for source code authorship verification with contrastive learning and transformer encoders", *Information Processing & Management*, Volume 62, Issue 3, May 2025. Available: https://doi.org/10.1016/j.ipm.2024.104005. Accessed on: May 15, 2025.
8. "Top 4 AI Source Code Detector Tools for Enterprises", *BlueOptima*, 11 April 2024. Available: https://www.blueoptima.com/top-4-ai-source-code-detector-tools-for-enterprises/. Accessed on: May 15, 2025.
9. "AI Content Detection in C", *Sapling*. Available: https://sapling.ai/programming-language/ai-content-detector/c. Accessed on: May 15, 2025.
10. "The enterprise AI platform – powered by your data", *You.com*. Available: https://you.com. Accessed on: May 15, 2025.
11. "AI Code Detector – AI Generated Code Analysis", *HESCHAT AI*. Available: https://surl.li/ebhtoi. Accessed on: May 15, 2025.
12. Hyunjae Suh, Mahan Tafreshipour, Jiawei Li, Adithya Bhattiprolu, Iftekhar Ahmed, "An Empirical Study on Automatically Detecting AI-Generated Source Code: How Far Are We?", *arXiv:2411.04299v1 [cs.SE] 06 Nov 2024*. Available: https://arxiv.org/pdf/2411.04299v1. Accessed on: May 15, 2025.
13. Азарянкулов С. А. «Спосіб ідентифікації використання чат-ботів зі штучним інтелектом при написанні студентами програм мовою C++»: *магістерська дис.: 123 Комп'ютерна інженерія / Азарянкулов Сеар Литвинович*. – Київ, 2023. – 99 с. Режим доступу до ресурсу: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64438. Дата звернення: 15.05.2025.

References:

1. Dayu Yang, Tianyang Liu, Daoan Zhang, Antoine Simoulin, Xiaoyi Liu, Yuwei Cao, Zhaopu Teng, Xin Qian, Grey Yang, Jiebo Luo, and Julian McAuley, "Code to Think, Think to Code: A Survey on Code-Enhanced Reasoning and Reasoning-Driven Code Intelligence in LLMs", *arXiv:2502.19411v1 [cs.CL] 26 Feb 2025*. Available: https://arxiv.org/html/2502.19411v1. Accessed on: May 15, 2025.
2. Juyong Jiang, Fan Wang, Jiasi Shen, Sungju Kim, and Sunghun Kim, "A Survey on Large Language Models for Code Generation", *arXiv:2406.00515v2 [cs.CL] 10 Nov 2024*. Available: https://arxiv.org/pdf/2406.00515. Accessed

on. May 15. 2025

3. Janek Bevendorff, Matti Wiegmann, Jussi Karlgren, Luise Durlich, Evangelia Gogoulou, Aarne Talman, Efstathios Stamatatos, Martin Potthast, and Benno Stein. "Overview of the "Voight-Kampg" Generative AI Authorship Verification Task at PAN and ELOQUENT 2024". *Working Notes of the Conference and Labs of the Evaluation Forum (CLEF 2024)*, Grenoble, France, 9-12 September, 2024 pp 2486-2506. Available. https://ceur-ws.org/Vol-3740/paper-225.pdf. Accessed on: May 15. 2025.

4. Jijie Huang, Yang Chen, Man Luo, and Yonglan Li. "Generative AI Authorship Verification Of Tri-Sentence Analysis Base On The Bert Model". *Working Notes of the Conference and Labs of the Evaluation Forum (CLEF 2024)*, Grenoble, France, 9-12 September, 2024. pp 2032-2037. Available: https://ceur-ws.org/Vol-3710/paper-213.pdf Accessed on May 15. 2025

5. Xuan Ji. "Detecting ai-generated code in C++: A comprehensive guide". BytePlus. Apr 25. 2025. Available: https://www.byteplus.com/en/topic/500341?title=detecting-ai-generated-code-in-c-a-comprehensive-guide. Accessed on: May 15. 2025

6. Oseremen Joy Idialu, Noble Saji Mathews, Rungroj Maipradit, Joanne M. Atlee, and Mei Nagappan. "Whodunit: Classifying Code as Human Authored or GPT-4 Generated - A case study on CodeChef problems". *MSR '24: Proceedings of the 21st International Conference on Mining Software Repositories*. 2024 pp 394 – 406. Available. https://doi.org/10.1145/3643991.3644926. Accessed on: May 15. 2025.

7. David Alvarez-Fidalgo and Francisco Ortin. "CLAVE: A deep learning model for source code authorship verification with contrastive learning and transformer encoders". *Information Processing & Management*. Volume 62. Issue 3. May 2025. Available: https://doi.org/10.1016/j.ipm.2024.104005. Accessed on: May 15. 2025.

8. "Top 4 AI Source Code Detector Tools for Enterprises". *BlueOptima*. 11 April 2024. Available: https://www.blueoptima.com/top-4-ai-source-code-detector-tools-for-enterprises/. Accessed on: May 15. 2025

9. "AI Content Detection in C". *Sapling*. Available: https://sapling.ai/programming language/ai content detector/c. Accessed on: May 15. 2025

10. "The enterprise AI platform – powered by your data". *You.com*. Available. https://you.com. Accessed on: May 15. 2025.

11. "AI Code Detector – AI-Generated Code Analysis". *HUMAN AI*. Available: https://surl.li/vbhtov. Accessed on: May 15. 2025

12. Hyunjae Suh, Mahan Tafreshipour, Jiawei Li, Adithya Bhattiprolu, Iftekhar Ahmed. "An Empirical Study on Automatically Detecting AI-Generated Source Code: How Far Are We?". *arXiv:2411.04299v1 [cs.SE] 06 Nov 2024*. Available. https://arxiv.org/pdf/2411.04299v1. Accessed on: May 15. 2025

13. Azvarankulov Ye. A. «Sposob identyfikatsii vykorystannia chat-botiv zi shtuchnym intelektom pry napysanni studentamy prohram inzheneriia» *: magisterska dys. : 123 Kompiuterna inzheneriia / Azvarankulov Yehor Anatoliiovych.* – Kyiv, 2023. – 99 s. Rezhym dostupu do resursu: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/64138. Data zvernennia: 15.05.2025.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-25
УДК 004.451
Мельник Василь Михайлович[1], к. ф-м. н, доцент
http://orcid.org/0000-0001-8282-6639
Багнюк Наталія Володимирівна[2], к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-7126-5455
Ройко Олександр Юрійович[1], к.т.н
https://orcid.org/0000-0001-8642-7707
Кізим Світлана Олександрівна[1], заступник директора з навчально-виробничої роботи
https://orcid.org/0009-0003-1205-2086
[1]Волинський фаховий коледж національного університету харчових технологій, Луцьк, Україна
[2] Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

МЕРЕЖЕВІ СОКЕТИ НА ОСНОВІ ПСЕВДОНІМІВ З ВІДДАЛЕНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ АДРЕС

Мельник В. М., Багнюк Н. В., Ройко О. Ю., Кізим С. О. Мережеві сокети на основі псевдонімів з віддаленою передачею адрес. На сьогодні ресурс мережевих адрес версії IPv4 у повному обсязі вичерпаний, проте багато користувацьких вузлів все ще використовують їх для спілкування за допомогою традиційних протоколів Internet. Поряд з цим діє технологія передачі мережевих адрес (ПМА) великого масштабу (ПВМ), призначена для включення адрес версії IPv4 в мережу, навіть у випадку повної їх вичерпаності. Хоча механізм ПМА володіє перевагами, в ньому є і прояв негативних ефектів, який у конкретних умовах спричиняє недоступність серверних додатків до глобальної мережі, спричиняючи створювання їм блокування їх роботи. Для обходу подібних ситуацій в роботі запропоновано мережеву сокетну бібліотеку на основі псевдонімів, призначені для роботи серверних додатків та їх комунікації на базі автоматизованого розподілу каталогів (АРК). Бібліотека повинна інтегрувати в собі механізм обходу ПМА, реалізований на застосуванні програмно розроблених функцій та АРК. В роботі подано також опис елементів та умови використання розробленого програмного забезпечення для автоматизованого розподілу каталогів сокетної бібліотеки з метою мережевої комунікації в операційній системі Linux.
Ключові слова: сокети-псевдоніми, віддалена передача адрес, автоматизований розподіл каталогів, UDP-протокол, комунікація додатків

Melnyk V., Bahniuk N., Royko O., Kizym S. Network sockets based on aliases with remote address transfer. Today, the arsenal of IPv4 network addresses is exhausted, but many user nodes still use them to communicate using traditional Internet protocols. Along with this, there is a large-scale network address transfer (NAT) technology (LSN) designed to include IPv4 addresses in the network, even in case of their full occupancy. Although the LSN mechanism has advantages, it also has negative effects, which in specific conditions causes the inaccessibility of server applications to the global network, causing them work to slow down or block. To circumvent such situations, a network socket library based on aliases is proposed in the article, designed for the server applications operation and their communication based on automated directory distribution. The library integrates a NAT bypass mechanism using program functions and automated catalog distribution. The paper also describes the elements and conditions to use the developed software for automated catalogue distribution of socket library for the purpose of network application communication in the Linux operating system.
Keywords: socket-aliases, remote address transfer, automated directory distribution, Protocol UDP, application communication

Постановка наукової проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій На сьогодні весь арсенал мережевих адрес версії IPv4 уже повністю вичерпаний, проте перед багатьма користувачами все ще стоїть необхідність у їх використанні мережевими вузлами для спілкування за допомогою традиційних Internet-протоколів. Швидке переведення протоколів версії IPv4 на одному з тому ж мережевому рівні на версію IPv6 є довготривалою задачею. Також діє технологія передачі мережевих адрес (ПМА) великого масштабу (ПВМ), призначена для підтримки і включення в мережу адрес версії IPv4 [1, 2], навіть у випадку повного їх розподілу всесвітньою асоціацією IANA (Internet Assigned Numbers Authority). У випадку підключення локальних чи мереж малого бізнесу за допомогою ПВМ є призначена лише єдина IPv4-адреса на зовнішній стороні мережевого інтерфейсу. Не дивлячись на те, що механізм ПМА володіє багатьма перевагами, в ньому має місце і прояв негативного ефекту, який у деяких конкретних умовах спричиняє недоступність серверних додатків до глобальної мережі, спричиняючи створювання їм блокування їх роботи та незручності для самих користувачів.

Для вирішення цієї задачі і можливості обходу подібних ситуацій в даній роботі запропоновано мережеву сокетну бібліотеку на основі псевдонімів для роботи серверних додатків з метою комунікацій на базі автоматизованого розподілу каталогів (АРК). Така бібліотека повинна інтегрувати в собі механізм обходу ПМА, реалізований на застосуванні програмно розроблених функцій та АРК. Подібну мережеву бібліотеку було скомпоновано на основі типових комунікаційних псевдонімів. Також подано опис елементів та умови використання розробленого програмного забезпечення для автоматизованого розподілу каталогів сокетної бібліотеки з метою мережевої комунікації в операційній системі Linux.

В основу механізму комунікації береться припущення про те, що кожна програма управляє IP-адресою, а мережевий сокет збоку взаємодіючих операційних систем має можливість її використовувати. Відомо, що для більшості мережевих додатків використовуються імена хостів, кожен з яких пов'язаний з IP-адресою комп'ютера, а всяка IP-адреса в необробленому форматі не є сприятливою до читання для більшості мережевих користувачів. В роботі [3] запропонована архітектура мережевих сокетів, яка базується на іменах-псевдонімах, а замість IP-адреси хоста сокетною константою для них є AF_NIKNAME, що використовується для комунікації мережевих додатків та виклику сокетного інтерфейсу. Сокет, заснований на іменах, надає уніфікований інтерфейс для мережевих розробників, бажаючих створити і використовувати зв'язок із віддаленим хостом на основі «повних доменних імен» (ПДІ). Система доменних імен вже стала фактичним стандартом для надавання імен Інтернет-службам, проте в деяких випадках вона не зовсім підходить для використання кінцевими користувачами.

Переваги в роботі з іменами серверів чи доменів мають місце тоді, коли за допомогою доменних імен надаються асоційовані з ними імена хостів. Оцінити обсяг затрат на них буває навіть і складно. Якщо вони і вирішують проблеми використання системи доменних імен, то середовище комунікації для них, в основному, забезпечують Інтернет-провайдери. Кожен раз в ході їх підключення до Інтернет-мережі може проявитися деякий недолік, який полягає в призначенні провайдером IP-адреси, що відрізнятиметься від попередньо двічі. Це говорить про неможливість використання одних і тих же імен хостів постійно, так як система доменних імен абсолютно непридатна для частої реєстрації запитів на ресурси за порівняно короткий проміжок часу. З іншого боку, отримання доменних імен кінцевими користувачами для запитів є важким завданням, так як в системах доменних імен діє власний простір імен.

Інколи навпаки, система доменних імен слугує корисною інфраструктурою для підтримки підсистеми сервісу в мережі, якщо описані вище проблеми вже наперед вирішені. У випадку, коли динамічно будуються окремі мережеві віртуальні об'єднання, вузли віртуальних об'єднань забезпечуються мережевим підключенням через Інтернет-провайдери після віддаленої передачі мережевих адрес. Під час спілкування таких вузлів необхідно для кожного віртуального об'єднання застосовувати унікальне ім'я.

Метою в даній роботі є створення системи сервісу на використанні імен та служб розподілених каталогів в одноранговій мережі, використання якої в мережевих середовищах з ПМА є досить складним завданням. Для даної системи розроблене програмне забезпечення з використанням імен, що називається мережевим автоматизованим розподілом каталогів (МАРК) [4], яке містить механізм обходу трансферу мережевих адрес. Для організації іменної комунікації на базі Linux програмно створено сокетну бібліотеку, яка застосовується для визначення псевдоніма сокета в одноранговій мережі (ВПОС) і використовує функції МАРК під час встановлення з'єднання з віртуальними групами. Таким чином, розроблені програми є призначені для спілкування віртуальних груп за допомогою МАРК в одноранговій мережі, поєднаній зі звичайною ПМА-мережею.

Основна частина дослідження.

Модель одноранговых мереж збоку архітектури не відрізняє систем, призначених для розподілених автономних мереж накладання збоку клієнта, від таких же систем зі сторони сервера. Кожен вузол одноранговой мережі може відігравати ролі маршрутизаторів, клієнтів чи серверів, утворюючи єдину суцільну мережу, і не потрібно, щоб кожен з них виконував функції продуктивної робочої станції.

Всі однорангові мережі поділяються на структуровані та неструктуровані. Неструктуровані мережі використовуються у додатках одноранговой комунікації більш ранніх серій. До них можна віднести такі системи, як Gnutella, Freenet та інші, які не застосовують ніяких адресних структур у своїх мережевих з'єднаннях, а обмін повідомленнями здійснюються за алгоритмом так званого наводнення, який на сьогодні є неефективним через непристосованість його до широких масштабних мереж, значним утрудненням мережевого трафіку та збільшенням кількості вузлів у одноранговій мережі.

З іншого боку, реалізація пошуку і надсилання запитів у структурованих одноранговых мережах є дуже ефективною, оскільки вони на відміну від неструктурованих одноранговых мереж використовують адресну структуризацію. Існує кілька алгоритмів одноранговых структурованих мереж, таких як Kademlia [5], Aekord [6], Symphony [7] та інші, які здатні використовувати структуру даних в якості таблиці розподіленого хешу (ТРХ), яка володіє розподіленими та децентралізованими функціями. ТРХ подібна до хеш-таблиці, що поєднує ключ зі значенням, застосовуючи таку пару для організації подальшої взаємодії. Для цього всі вузли одноранговых мереж повинні бути відповідно структуровані і представляти собою «попарні накопичення» для розподілених хешових таблиць. Це означає, що дані цих таблиць повинні розміщуватися на накопиченнях (buckets) [5], які в дійсності і є вузлами одноранговых мереж. Це

досягається завдяки використанню кожним вузлом однакової хеш-функції. Внаслідок цього двочий простір даних ТРХ лінійно розширюється, так як розмір структурованої одноранговоі мережі також має тенденцію збільшуватися. Проте трафік повідомлень логарифмічно розширюється, так як отримання їх логарифмічно зростає за залежністю log(N), де N – це кількість вузлів у двочій системі.

Спочатку розглядалася можливість реалізації безсерверної сервісної системи на базі ідеї та залучення механізму ТРХ, яка могла б слугувати сервісним вузлом для реалізації автороподілу директорій у віртуальних об'єднаннях через Інтернет, які використовують ТРХ-функції. Механізм автоматизованого розподілу каталогів в одноранговій мережі комунікацій володіє базою даних, яка містить індекси ключових значень, використовуючи ТРХ на внутрішній стороні взаємодії. Це надає можливість доступу та отримання інформації про ресурси зберігання у всіх вузлах автоматизованого розподілу каталогів – можливість визначити їх псевдонім, що ставиться у відповідність для реалізації з'єднання між активною мережевою інформацією та базою даних з індексами ключів.

Досить часто неможливо реалізувати побудову мережі так, щоб алгоритми Kademlia чи інші відомі типи [5-7], використовуючі ТРХ, включали б вузли трансферу мережевих адрес всередині власних мереж. Тому розглянемо доцільність механізму обходу трансферу мережевих адрес в системі з автоматизованим розподілом каталогів.

Наглядна схема накладання механізму обходу передачі мережевих адрес на мережевий механізм з накопиченням каталогів для групового сервісу зображена на рис. 1. З її аналізу видно, що існує два типи вузлів мережі накладання на таблиці розподіленого хешу. Перша мережа, під назвою «верхня», яка здійснює розподілений UDP-обхід через мережу з трансфером мережевих адрес (UDP Distributed Traversal through NAT – UDTN), а «нижня» – виконує сервіс для ТРХ. Верхня мережа UDTN у своєму складі містить лише вузли, які володіють глобальною IP-адресою, а нижня – є сервісною для ТРХ, яка включає в себе всі вузли одноранговоі мережі з авторозподілом каталогів. Для кожного вузла в верхній мережі зберігаються IP-адреса та номер порта і асоціюється з ідентифікатором вузла з нижньої мережі. З іншого боку, нижня сервісна мережа забезпечує сервіс індексів ключових значень таблиць розподіленого хешу для користувачів з автоматизованим розподілом каталогів.

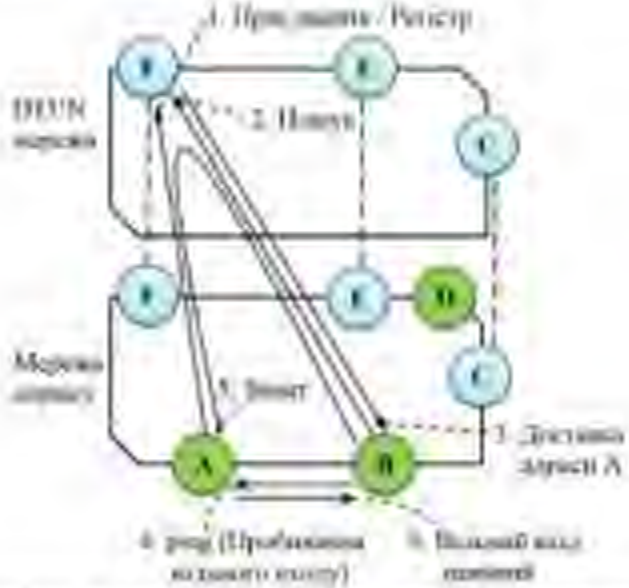


Рис. 1. Обхід трансферу мережевих адрес за допомогою накопичення каталогів для групового сервісу

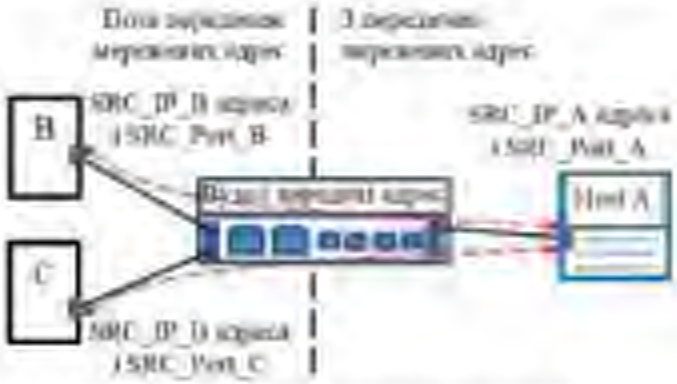
Вузли A, B і D (рис. 1) знаходяться всередині мережі з ПМА, а вузли C, E і F володіють глобальними IP-адресами. Обхід передачі мережевих адрес виконується в декілька кроків. Якщо вузол A приєднується до одноранговоі мережі з накладанням автоматизованого розподілу каталогів, то він реєструє свій IP-адресу та номер порта в мережі розподіленого UDP-обходу трансферу мережевих адрес, тобто в мережі UDTN. В той же момент часу тільки вона може бути однозначно визначена між підсистемою мережевим трансферу адрес або залишатися взагалі не визначеною.

Усі вузли з авторозподілом каталогів в одноранговій мережі використовують в якості таблиць маршрутизації розподілений обхід UDP трансферу мережевих адрес та службову мережу для таблиць

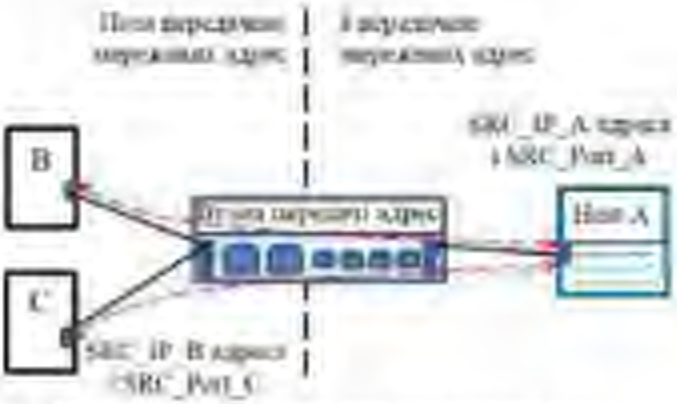
розподіленого хешу. Іншими словами, коли вузол B з'єднується з вузлом A, йому необхідно отримати інформацію про вузол A з верхньої мережі, що містить тільки вузли з глобальною IP-адресою UDTN. Для цього вузол B відокремлює і використовує позначений вузол F, який надає власну таблицю маршрутизації верхньої мережі UDTN для виконання такого обходу. Позначений вузол F відноситься до верхньої мережі UDTN і надає відповідь на інформаційний запит, який включає в себе IP адресу та номер порта вузла A. Після цього вузол B надсилає спеціальне пінг-повідомлення, або повідомлення Kademlia [5], і «пробиває дірку-лаз» для можливості доступу до цього вузла. Однак вузол B вимагає від вузла F пробивання отвору з'єднання до вузла A, що і виконується.

Після отримання вузлом A відповіді від вузла B на запит пробивання дірки доступу через проміжний вузол F, вузол A надсилає вузлу B спеціальне пінг-повідомлення. За допомогою цієї процедури на цей момент уже мають бути встановленими та отриманими дані ключів-значень від таблиці розподіленого хешу (нижньої мережі), якщо мережа накладання, що здійснює розподілений UDP-обхід передачі мережевих адрес, включає визначену кількість вузлів всередині звичайної мережі з ПМА. Верхня мережа з автоматизованим розподілом каталогів для з'єднання між вузлами використовує протокол транспортного рівня UDP.

Існують два види передачі мережевих адрес (рис. 2), які відрізняються власними реалізаціями [8]. Використовуючи їх можна провести відслідковування процедури трансферу мережевих адрес через UDP протокол. Симетрична система передачі мережевих адрес доступна для виконання запитів з однієї і тієї ж внутрішньої IP-адреси та порта до конкретно призначених IP-адреси та порта, які відображаються на одну і ту ж саму пару зовнішньої адреси IP та порта. Коли один і той же хост виконує надсилання пакета повідомлення з однаковими адресою джерела і значенням порта, призначеного різним кінцевим точкам в різних напрямках, то в таких випадках використовується таке відображення. Однак, лише зовнішні хости, що отримали пакет, мають можливість надіслати UDP-пакет в зворотну сторону до внутрішнього хоста.



Механізм симетричної передачі мережевих



Механізм конічної передачі мережевих адрес

Рис. 2. Типи трансферу мережевих адрес

Конусна система трансферу мережевих адрес доступна для створення з'єднань всіх запитів з однієї внутрішньої IP-адреси та порта, асоційованого з однією зовнішньою IP-адресою та портом. В цьому

випадку будь-які пакети повідомлень від зовнішніх хостів доставляються до внутрішнього хоста і якщо точка отримання пакета, визначена IP-адресою та номера порта, вже відображена, то IP-адреса та номер порта джерела відправки зовсім не мають впливу на процес доставки. Процедура обходу передачі мережевих адрес, наведена вище, властива тільки для конусної мережі з трансфером адрес. Мережа з обходом передачі адрес протоколом UDP виконує послугу ретрансляції повідомлень і є подібною до TURN [9], призначеної для вузлів, підпорядкованих симетричній мережі з ПМА.

Мережа з автоматизованим розподілом каталогів для групової комунікації і обходом ПМА застосовує два типи процедур: пробивання дірок-доступів для зв'язку і передавання повідомлень або їх ретрансляцію. Останній тип доступний для обходу обох типів ПМА, і являється прикладкою до ресурсів. Таким чином, тип пробивання зв'язків є більш переважаючим, ніж ретрансляція повідомлень.

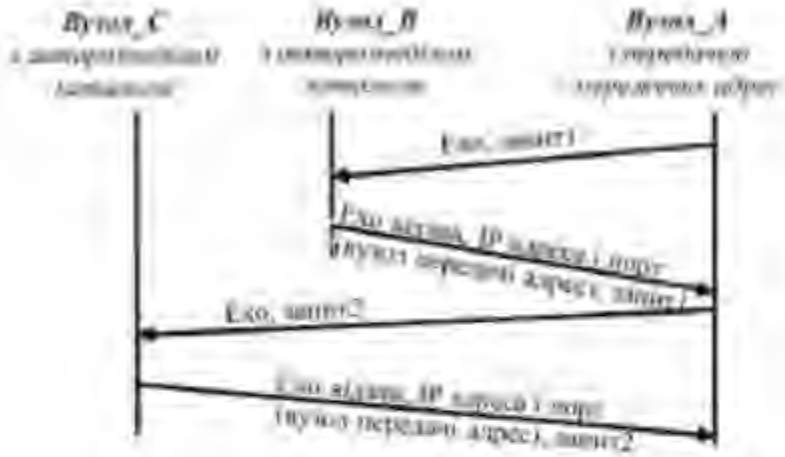


Рис. 3. Послідовність типів підтвердження

Послідовність утворення з'єднання для типів ПМА схематично зображена на рис. 3, з якого видно, що якщо вузол А, керований мережею ПМА, приєднується до мережі з автоматизованим розподілом каталогів для групового сервісу, то він відмежовується від мереж з конусною або симетричною ПМА, використовуючи комунікаційний зв'язок між двома вузлами, характерний для мережі з розподіленим UDP-обходом мережевої передачі адрес (UDTN). В цьому випадку вузол А надсилає ехо-повідомлення до вузла В в UDTN-мережі з запитом 1 (рис. 3), який містить ідентифікатор згенерованого випадкового числа. В свою чергу вузол В надсилає повідомлення-відповідь, що містить IP-адресу джерела і номер порта, на даний вузла А з ехо-повідомленням. Далі вузол А і вузол С обмінюються своїми аналогічними повідомленнями, як і раніше. Повідомлення з вузла А також передає два параметри власної інформації: зовнішню IP-адресу та номер зовнішнього порта зі сторони ПМА-мережі, попередньо надісланих з повідомлень-відповідей від вузлів В та С.

Таким чином, типи ПМА можуть бути обґрунтовані і встановлені цими надісланими повідомленнями. Якщо наявні обидва порти з однаковими номерами, то це говорить про дію конічної ПМА, а в іншому випадку – діє симетрична ПМА. З цього моменту мережа з розподіленим UDP-обходом передачі адрес має можливість для вузла А призначити процедуру для механізму обходу ПМА. Якщо діє конічний тип ПМА, то вузлу А надається пробивання дірок-з'єднань, а якщо це симетричний ПМА, то вузлу А присвоюється тип, асоційований з повідомленням.

3. Надійність передачі даних та присвоєння імені

Мережа з автоматизованим розподілом каталогів для обміну даними чи їх приєднання використовує протокол UDP, який не використовує попередньо встановленого з'єднання і забезпечує звичайний обмін, орієнтований на транзакції, не маючи власних функцій для ведення контролю та відновлення помилок. Однак в мережевих додатках потрібна надійність під час використання UDP, на основі якої протокол вищого рівня чи додаток могли б забезпечувати контроль помилок в процесі передачі даних в режимі реального часу. Тому з використанням протоколу UDP мережеві додатки важко підтримують процедуру об'єднання кількох повідомлень, особливо якщо розмір повідомлення перевищує

характерний розмір максимального блоку передачі (MOH). Наприклад, система доменних імен (СДІ), яка є надійною для UDP-обміну, накладає обмеження для запитів на повідомлення до 512 байтів.

Існує надійний протокол даних (НПД), орієнтований на зв'язок на транспортному рівні [10], який призначений для ефективної підтримки об'ємної передачі даних програмами моніторингу та управління на хостах, зокрема, їх завантаження, налагодження та діагностики. Ці програми вимагають точної інформації та чітко визначених сигналів. Тому даний протокол забезпечує надійну передачу даних зі збереженням межі повідомлення. Оскільки НПД був створений давніше, то сьогодні деякі операційні системи не можуть реалізувати його у власній мережевій стек. Однак, на його основі розроблено мережевий *протокол для надійної передачі пакетів даних* (ПНПД) засобами *автоматизованого розподілу компонентів для групового сервісу* (АРКГС), поведінка якого досить подібна на звичайний надійний протокол передачі даних [8]. ПНПД утворює сеанс зв'язку після отримання шляху проходження через мережу з ПМА, який є також типовим до пробування з'єднань або ретрансляції повідомлень.

Однак сеанс з'єднання утримує ПМА на подальшому шляху передавання пакетів аж до кінця з'єднання. Тому, використовуючи ТРХ, реалізується мережевий сервіс, який асоційовано прямое з ПНПД і надає можливість надійного обміну повідомленнями, навіть які перевищують характерний розмір максимального блоку передачі. З використанням ПНПД можна легко ідентифікувати кожен сеанс комунікації в мережі з АРКГС. Якщо дана функція у операційній системі виконує сервіс процесів між собою як мережевий сокет, то вона є доступною не лише для ТРХ в мережі з АРКГС, але і для інших звичних мережевих програм, дозволяючи їм комунікувати між собою через віддалену мережу з ПМА.

АРКГС утворює службу на основі імен, використовуючи ТРХ, яка уже згадувалася, для програм, комунікуючих на базі ПНПД. ТРХ також заповнює таблицю маршрутизації встановленої мережі накладання з метою асоціювання ідентифікатора кожного вузла та його IP-адреси, а АРКГС утримує таблицю маршрутизації мережі накладання, в якій містяться ідентифікатори та IP-адреси у парі для кожного з вузлів. Усі АРКГС-комунікації ідентифікуються однозначно і відрізняються між собою, а базові додатки ПНПД різняться номерами ПНПД-портів. Для дискретизації кожен ідентифікатор накладання виглядає як хеш, що володіє 160-бітовою структурою і для звичайних мережевих користувачів являється кодовою інформацією, не придатною для читання. Крім того, в мережі з АРКГС можна прив'язувати псевдонім із власним ідентифікатором, вкладаючи йому в якості даних асоційовану пару: значення – ключ в ТРХ, де в розумінні ключа фігуруватиме псевдонім, а значення міститиме ідентифікатор.

Рисунок 4 демонструє рівневу побудову АРКГС та схему іменування для двох комунікуючих додатків, заснованих на ПНПД. Вузол комунікації на стороні сервера очікує з'єднання від клієнта за допомогою утвореного доступу. Зі схеми видно, що комунікуючі додатки мають можливість з'єднуватися, використовуючи власні ідентифікатори і клієнтський вузол може взаємодіяти з вузлом сервера через визначення його псевдоніма, якщо все-таки серверному вузлу надано його.

Рис. 4. Мережевий рівень характерів для моделі накопичення каталогів для групового сервісу

Також послуги ТРХ володіють механізмом оновлення даних, а збережені дані, що передаються протягом тривалого часу, можуть зникати із сегментів. Порожні сегменти можуть використовуватися іншими вузлами для збереження нових пар даних типу ключ-значення, однак таке збереження їх залежить від конкретних реалізацій ТРХ. Можна також змінювати у вільних сегментах дані типу ключ-значення, виконуючи їх перевстановлення. В роботі пропонується можливість реалізації з'єднання на узгодженому використанні двох механізмів: допустимих сегментів та розподілених даних ключ-значення в реалізації служби іменування АРКГС. Збережені дані типу ключ-значення вже не можна переписати (змінити) в

зайнятих сегментах зберігання. Управління цими сегментами виконується через ідентифікатори кожного із вузлів і тільки ті вузли, які на початку передають в сегменти дані типу ключ-значення, мають за правом доступу продовжувати використовувати їх, навіть і тоді, коли вузли покидають з'єднання з АРКГС.

АРКГС також може використовувати перевірку цифрових підписів для реалізації «доведіть хорошої або PGP-конфіденційності» [11] та підвищення надійності роботи з псевдонімами. Служба іменування для мережі з АРКГС належить від ТРХ і має можливість використовувати псевдонім у всіх АРКГС-вузлах, якщо псевдонім ще ніким не зайнятий. Для спроби отримання псевдоніма вузлачи, служба видає спеціальний запит для вводу даних типу ключ-значення, який дотримується PGP-конфіденційності.

Рисунок 5 демонструє систему зв'язку за допомогою пари ключ-значення. Тут зображено три фізичні вузли, утворюючи групове віртуальне з'єднання у мережі накладання з АРКГС. Передбачається, що віртуальні вузли в даній групі виконують між собою обміни файлами з відкритими ключами, застосовуючи механізм PGP-конфіденційності. Якщо вузол А виконує розміщення пари даних типу ключ-значення для передавання у вузол В, то ці дані підписуються віртуальним вузлом А. Якщо віртуальний вузол С отримує дані, що намагається розмістити вузол А, то вузол С має можливість виконувати перевірку підпису, використовуючи свою довірчу базу даних накладання, де уже збережена інформація про вузол А і його відкритий ключ. Також застосування PGP-конфіденційності підвищує групову мережу на рівні довіри, а для підвищення надійності з'єднання між фактичним користувачем вузла та файлом відкритого PGP-ключа [12] можна використати цифровий підпис збоку користувача третьої сторони. Завдяки даному підходу можна з довірою використовувати з'єднання, яке не може бути самостійно підписаним до іншого файлу з відкритим ключем, що належить невідомому користувачу.

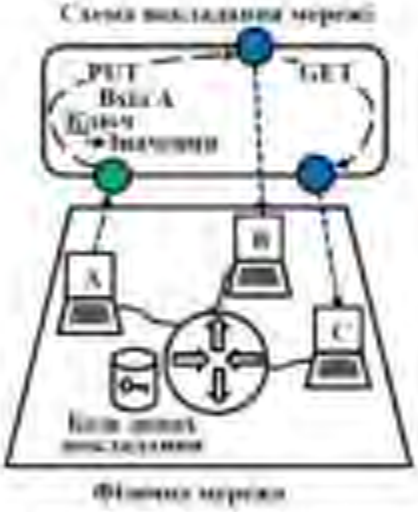


Рис. 5. Організація обміну даними за допомогою використання пари типу ключ-значення

4. Інтерфейс визначення псевдоніма для АРКГС

Для забезпечення сервісної системи, орієнтованої на псевдоніми, для віртуальної комунікуючої групи пропонується метод визначення псевдоніма для одноранкового сокета (ВПОС), реалізований програмним забезпеченням у вигляді бібліотечного пакета. Для реалізації АРКГС система включає в себе розроблену сокетну бібліотеку на основі псевдонімів, яка надає користувачам/додаткам відповідний інтерфейс функцій. Автоматизований розподіл каталогів для групового сервісу – це доменне програмне забезпечення, яке реалізує сервіс директорії, використовуючи ТРХ на базі Kademlia [13], і механізм обходу ПМА. Доменне програмне забезпечення взаємодіє надавати незалежний сервіс для бази з даними типу ключ-значення, так як воно оверлує програмний механізм визначення псевдоніма сокета в одноранковій мережі та самі користувачі. Для цього було створено інтерактивний інтерфейс командного рядка (ІКР) для АРКГС, який виконує перевірку достовірності дій процесу ВПОС та користувачів.

Опишемо командний інтерфейс, розроблений і наданий для АРКГС, який містить наступні функції: new – створення нового вузла, delete – видалення існуючого вузла, set_id – встановлення власного ідентифікатора АРКГС, get_id – отримання ідентифікатора АРКГС, join – приєднання до мережі з АРКГС, put – встановлення значення за відомим ключем, get – отримання значення за даним ключем, rdp_listen – створення бічного прослуховуючого сокета для ПНПД, rdp_connect – створення бічного сокета для підключення ПНПД і інші. В момент запуску АРКГС необхідно з'єднатися з мережею накладання та

виконати резервування псевдоніму для кожного вузла. Також в межах одного процесу на АРКГС можна створювати групу вільних вузлів і коли вузол створюється, команда *create* вимагає від АРКГС-процесу його PID, який в подальшому буде використовуватися іншими розробленими командами для здійснення управління. В цьому випадку у межах АРКГС-процесу функція мультиплексування вузлів використовує багатокористувацьке середовище в якості хмарного комп'ютера чи приватного віртуального сервера.

Однак на практиці не обов'язковим для одного користувача створювати багато вузлів. До того ж стоїть завдання приєднання до мережі накладання кожного з них від ІКР, яка для реалізації приєднання вимагає IP-адресу та номер порта одного із вузлів мережі з розподіленим обходом UDP трансферу мережевих адрес. В цей момент вузол АРКГС використовує автоматично визначений АРКГС-ідентифікатор з хешованим рядком про мережеву інформацію для кожної фізичної машини, тобто її IP-адресу та номер порта.

Керування доступними сегментами пам'яті АРКГС використовується також за допомогою ідентифікаторів. Якщо фізичні вузли ПК, які використовують АРКГС, перемішуються в інше місце мережевого розташування, то для них генеруються різні ідентифікатори. Відповідно, якщо такий вузол через короткі проміжки часу знову приєднується до мережі накладання, то він вже не зможе використовувати той самий (попередній) псевдонім, а функція, яка надає права доступу до сегментів, збереженому сегменту присвоюється ідентифікатор попереднього вузла. Для встановлення статичних ідентифікаторів в реалізовано команду *set_id*, використовуючи звичайний інтерфейс командного рядка (ІКР). Дана команда використовує символьний рядок типу *string* для генерації хешу, асоційованого з ідентифікатором АРКГС, який використовується перед командою *join* для виконання приєднання. У ВПЮС заданий символьний рядок *string* використовує хешоване значення файлу відкритого ключа для виконання умов PGP-конфіденційності та пароль користувача. Таким чином, це дає можливість постійно виконувати приєднання псевдоніма.

Надалі, після приєднання вузол АРКГС повинен призначати псевдонім, асоційований із власними ідентифікаторами, які і необхідно отримати. Для цього розроблена команда *get_id*, значенням повернення якої є ідентифікатор вузла, і для повернутого ідентифікатора вона виконує орів яку псевдоніма, використовуючи команду *put*, що передає відомі нам дані типу ключ-значення в ТРХ. Пара даних ключ-значення використовує інформацію про ресурси псевдоніма, а ВПЮС надає бібліотечні інтерфейси, які покривають виконання згаданих дій та команд.

Для створення сокета псевдоніма використовується сокет ПВПД з визначеним псевдонімом від ТРХ. Для того, щоб забезпечити дію даної функції для процесів операційної системи, їм потрібно мати можливість комунікації між внутрішніми процесами. ВПЮС в цей момент з'єднується з АРКГС через контакт, обумовлений ІКР, використовуючи сокет Unix Domain. Проте сокет, який використовує ІКР між ВПЮС і АРКГС, не є доступний для передачі необхідного байтового потоку даних, тому що ІКР утворює базову лінію зв'язку. Отже, для надання сокета псевдоніма для інших процесів, необхідно ще раз з'єднатися з сокетом Unix domain.

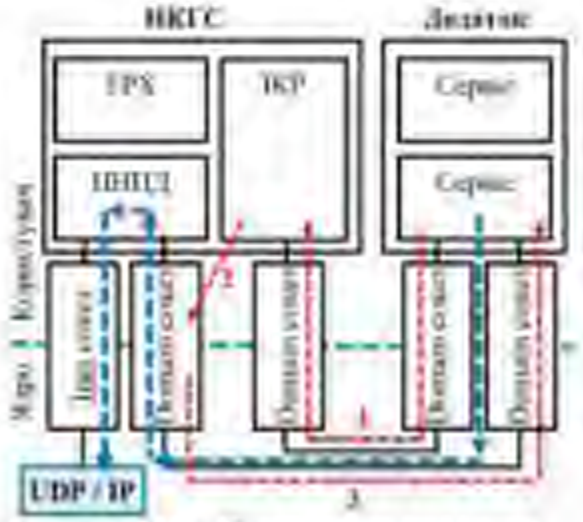


Рис. 6. Схема сокета псевдоніма

На рисунку 6 подана схема взаємодії ВПОС та АРКГС, на якій також наведено схему побудови шляху сокета псевдоніма в діючій операційній системі. В дослідженні розроблена прикладна програма, яка використовує сокет псевдоніма у ВПОС. Першим кроком додаток надсилає команду ІКР в момент, коли він починає відокремлювати сокет псевдоніму для використання за допомогою ВПОС. То ж якщо додаток являє собою серверне програмне забезпечення, він використовує команду *rdp_listen*, а якщо він є програмним забезпеченням з боку клієнта, то ним використовується команда *rdp_connect*. На даний момент ВПОС здійснює налаштування сокета UNIX Domain до прийому з'єднання від ПНПД. Далі ІКР отримує повідомлення і аналізує його. Якщо прийняте повідомлення є від *rdp_listen*, то АРКГС створює сокет прослуховування з ПНПД. У разі, коли повідомлення є від *rdp_connect*, то він створює сокет з'єднання з намаганням встановити сеанс зв'язку із серверною програмою, використовуючи ПНПД.

На завершення, АРКГС підключається до ВПОС через сокет Unix Domain. У випадку, коли створити сеанс не вдається, АРКГС повертає повідомлення про помилку через ІКР. Для виконання команд *rdp_listen* та *rdp_connect* потрібен АРКГС-ідентифікатор та номер ПНПД-порта. В результаті ВПОС буде створений і призначений для дії визначення псевдоніма перед тим, як зазначені команди виконають надсилання. Звідси слідує, що аргументом передавання ідентифікатора вузла є АРКГС-ідентифікатор, який також призначений для виконання проходження по мережі і представляє задалегідь визначений псевдонім перед виконанням зазначених операцій.

5. Результати реалізації та обговорення

В роботі застосовано програмне забезпечення АРКГС, створене в засобами C++, та ВПОС – засобами C Objective. Вони використовують відомі для цих програмних середовищ бібліотеки *libevent*, *boost*, *libcrypto*, *libpgpme*, *libresolv*, а також *Framework Foundation*, *AppKit*, *Security* та інші засоби. Розроблене програмне забезпечення випробувано в операційній системі Linux Ubuntu, а інші характерні показники машинних вузлів були наступними: CPU – Xeon 2.4GHz, пам'ять – 8 GB, диск – SATA 160 GB, мережа – Gigabit Ethernet.

Бібліотека сокета псевдоніма подається як програмний об'єкт, клас якого об'єднує в собі наступні функції: *create()*, *sockfd()*, *sendto()*, *recvfrom()*, *listen()*, *connect()* та *close()*. Об'єкт класу за допомогою функції *create()* створює сокет псевдоніма. Якщо він використовується серверною програмою, то об'єкт використовує функцію *listen()*, якій необхідно надати в якості аргументу лише номер ПНПД-порта. Якщо об'єкт використовується програмою клієнта, то він використовує функцію *connect()*, для якої потрібно надати два аргументи: АРКГС-ідентифікатор або псевдонім та номер ПНПД-порта. Встановлений сокет використовує методи *sendto()* і *recvfrom()*. Коли сеанс спілкування закінчується, його закриває класова функція *close()*. Використовуючи сокет UNIX-domain, ВПОС надає псевдонім, API якого подібний на звичайний сокет, однак для реалізації зв'язку він не використовує традиційний мережевий протокол. Створений об'єкт сокета UNIX-domain є звичайним компонентом в операційних системах стандарту POSIX, який може бути використаний для виводу дескриптора сокета визначеного екземпляра класу за допомогою функції *sockfd()*. Дескриптор сокета надається деяким системним викликам, призначеним для реалізації сокетних подій *select()*, *poll()*, *kevent()* і інших.

Описуючи ефективність роботи ВПОС в єдності з АРКГС, розглянемо рис. 7, який ілюструє масштабованість вузлів в накладній мережі. Горизонтальна вісь позначає кількість діючих вузлів, а вертикальна вісь відмічає середній час реагування. Пошук псевдоніма виконано 50 разів, а під час фіксувався час реагування і обчислене його середнє значення подавалося для побудови графіка. Вимірювання проведено в точках, позначених червоним кольором на графіку. Оцінка вимірювання роздільної здатності псевдоніма виконана в робочій мережі з АРКГС між 10-ма фізичними робочими станціями у тій же локальній мережі із характеристиками, наведеними вище. Число вузлів АРКГС варіювалося від 40 до 3000 на 10 робочих станціях шляхом балансування навантаження. Час вимірювання роздільної здатності псевдоніма в експерименті з використанням ВПОС становив різницю часу відправки запиту та часу отримання відповіді за допомогою функції *getSearchTime()*.

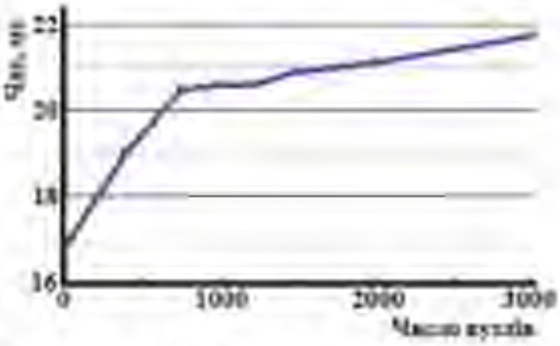


Рис. 7 – Залежність часу пошуку псевдоніма від кількості вузлів

За результатами проведених вимірювань часу пошуку для 40 вузлів він приблизно становить 16,9 мс (мілісекунд). Зі зростанням кількості вузлів час пошуку зростає не лінійно і, наприклад, для 3000 вузлів він досягає приблизно 21 мс, а розбіжність в кожній точці в ході виконання вимірювання становила в середньому ~0,5 мс. Порівняння отриманих усереднених значень говорить про те, що у діючій системі ВПЮС та АРКГС час розбіжності є порівняно досить незначний. АРКГС також володіє масштабованістю, так як зростання часу відклику не було серйозно обумовлене збільшенням числа вузлів пошуку. Проте експериментальні умови в ході проведення вимірювань для випадків зростання кількості вузлів майже не відрізнялися від експериментальних вимірювань для невеликої кількості вузлів, де час відгуку становив 17 мс.

Надалі було б добре провести аналіз величини пропускної здатності чи оцінки продуктивності роботи такої системи в реальному мережевому середовищі. Для отримання даних реального аналізу ефективності роботи експериментальної тестової мережі необхідні широкомасштабні тестові стенди, ПМА-бокси та врахування складніших умов аналітичного оцінювання.

Висновки. Представлено розробку і застосування ВПЮС, РКГС з розробленим програмним забезпеченням для мережевого сокета-псевдоніма з діючими функціями для реалізації механізму обходу ПМА та визначення конкретних псевдонімів з правом іменної комунікації. Так як реєстрація імен користувачів домашньої мережі для віртуальних об'єднань з боку Інтернет-провайдерів є складною через симплексність простору імен СДІ та недоступність його до іменування в кожному віртуальному комунікаційному об'єднанні, в роботі було розроблено службу іменування під назвою АРКГС, яка виконує сервіс розподілених каталогів в однорівневій мережі з обходом ПМА. За її допомогою реалізуються призначення та виявлення псевдонімів для кожного комунікуючого вузла. Якщо віртуальні об'єднання або вузли кінцевих хостів мають можливість використовувати службу іменування, то вона не може з'єднуватися з внутрішніми вузлами мереж з ПМА.

Запропонований в даній роботі протокол комунікації може бути реконструйований і перенесений для роботи у версію IPv6, однак таке дослідження вимагатиме значних зусиль та затрат. На відміну від провайдерських технологій LSN або CGN для розширення ПМА-мережі, в даній роботі було розроблено сокетну бібліотеку псевдонімів ВПЮС і програми функції її використання з метою здійснення комунікації з мережевими вузлами, навіть при їх знаходженні всередині мереж з ПМА. Коректну роботу розробленої системи було підтверджено на базі систем Linux Ubuntu з варіюванням кількості комунікуючих вузлів, а також механізму автентифікації пакетів повідомлень за допомогою цифрових підписів.

Список літератури

1. Yamagata I., Miyakawa S. Рішення для обміну адресами IPv4: плюси та мінуси. URL: http://tools.ietf.org/html/draft-[illegible]-05. Інтернет драфт, червень 2024. URL: https://surl.li/[illegible] (дата звернення: 15.09.2024).
2. Mikko D. Що таке NAT операторського рівня (LSN/CGNAT). Глосарій термінів. Інтернет драфт. 2024. URL: https://surl.li/[illegible] (дата звернення: 15.09.2024).
3. Tianlong Li, Tian Song, Yating Yang/Authors Info & Claims. iStack: загальний іменований стек протоколів для іменованих мереж даних. NSDI'24: Матеріали 21-го симпозіуму USENIX з проектування та впровадження мережевих систем. Вид. [illegible], 2024. № [illegible] Стаття 16. с. 267-280.
4. Sylvester I. Автоматизована каталогізація - бібліотечно-інформаційний менеджмент. 2024. URL: https://surl.li/[illegible] (дата звернення: 25.10.2024).
5. Томас Б. Однорангова (P2P) архітектура. Останнє оновлення : 23 Трав. 2024. URL: https://surl.cc/[illegible] (дата звернення: 15.10.2024).
6. Ion Stoica, Robert Morris, David Karger & Frans Kaashoek. Chord: Масштабована однорангова служба пошуку для інтернет-додатків. [illegible]. 2024. Каліфорнійський університет. URL: https://surl.cc/[illegible] (дата звернення: 25.10.2024).

7. Tower K. Хешування в розподілених системах. 2022. Електронний ресурс. URL: https://surl.lu/kruvlo (дата звернення: 05.11.2024)
8. Prasuname R. Перехід до ключових моментів проходження протоколу датаграм користувача UDP через транслятори мережевих адрес. 2023. URL: https://surl.li/rovgbv (дата звернення: 08.11.2024).
9. Rosenberg J. Перехід до ключових моментів проходження за допомогою ретрансляційного NAT. 2023. URL: https://surl.lu/jktupw (дата звернення: 05.11.2024)
10. E. Krings. Протоколи потокової передачі для прямого мовлення. Все, що вам потрібно знати. Опубліковано 26 липня 2024 р. Електронний ресурс. URL: https://surl.li/dhwjhq (дата звернення: 05.11.2024).
11. Hana H. Підпис коду – налаштуйте SignServer і OpenPGP для підпису коду та пакетів. 2023. URL: https://surl.lu/berplu (дата звернення: 10.03.2025).
12. Brad Wyro. Шифрування, дешифрування та керування ключами на стороні сервера за допомогою OpenPGP. Блог MDaemon Technologies. 2024. URL: https://surl.li/comule (дата звернення: 10.01.2025).
13. Christopher Skalnik. Розподілені хеш-таблиці з Kademlia. 2021. URL: https://surl.li/exitth (дата звернення: 10.01.2025).

References

1. Yamagata I., Miyakawa S. IPv4 Address Sharing Solutions: Pros and Cons. http://tools.ietf.org/html/draft-nishitani-cgn-05 Internet Draft. August 2024. URL: https://surl.li/ecevw1 (date of access: 15.09.2024).
2. Mikko D. What is Carrier-grade NAT (CGN/CGNAT)? Glossary of Terms. Internet Draft. 2024. URL: https://surl.lu/erjtuk (date of access: 15.09.2024).
3. Tianleng Li, Tian Song, Yating Yang/Authors Info & Claims. iStack: a general and stateful name-based protocol stack for named data networking. NSDI'24: Proceedings of the 21st USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Pub. Jun., 2024. Article No.: 16. P. 267-280.
4. Sylvestris I. Automated cataloging – library and information management. 2024. URL: https://surl.lu/kiutsa (date of access: 25.10.2024).
5. Tower K. Peer to Peer (P2P) Architecture. Last Updated : 23 May, 2024. URL: https://surli.cc/jovevv (date of access: 15.10.2024).
6. Ion Stoica, Robert Morris, David Karger & Frans Kaashoek. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. Videoresource. 2024. California university. URL: https://surli.cc/fyjwvc (date of access: 25.10.2024).
7. Tower K. Hashing in Distributed Systems. Dec., 2022. URL: https://surl.lu/kruvlo (date of access: 05.11.2024).
8. Prasuname R. Jump to key moments of Traversal of User Datagram Protocol (UDP) through Network Address Translators. April, 2023. URL: https://surl.lu/rovgbv (date of access: 05.11.2024).
9. Rosenberg J. Jump to key moments of Traversal Using Relays around NAT. Jun 2023. URL: https://surl.lu/jktupw (date of access: 08.11.2024).
10. E. Krings. Streaming Protocols for Live Broadcasting. Everything You Need to Know. Posted on July 26, 2024. URL: https://surl.li/dhwjhq (date of access: 05.11.2024).
11. Hana H. Code Signing – Set up SignServer and OpenPGP to Sign Code and Packages. Sept., 2023. URL: https://surl.lu/berplu (date of access: 10.03.2025).
12. Brad Wyro. Server-side Encryption, Decryption & Key Management with OpenPGP. MDaemon Technologies Blog. 2024. URL: https://surl.li/comule (date of access: 10.01.2025).
13. Christopher Skalnik. Distributed Hash Tables with Kademlia. 2021. URL: https://surl.li/exitth (date of access: 10.01.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-26
УДК 004.5
Пукач Андрій Ігорович, к.т.н.
https://orcid.org/0009-0001-8563-3331
Теслюк Василь Миколайович, д.т.н., проф
https://orcid.org/0000-0002-5974-9310
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КОМПОНЕНТА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДБОРУ КАНДИДАТІВ НА ОСНОВІ ЇХ ПОЛІФАКТОРНИХ ПОРТРЕТІВ СУБ'ЄКТИВІЗАЦІЇ СПРИЙНЯТТЯ ОБ'ЄКТІВ ЛЮДИНО-МАШИННОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Пукач А. І., Теслюк В. М. Інтелектуальна компонента автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії. Робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії з урахуванням їх поліфакторних портретів, що належить до кластеру задач науково-прикладних проблематик автоматизації й інтелектуалізації людино-машинної взаємодії. Розроблено відповідну спеціалізовану інтелектуальну компоненту автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії, що дає змогу розв'язати поставлену науково-прикладну задачу. Розроблено базову математичну модель відповідної компоненти, що забезпечує можливість моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії в автоматизованому режимі. Розроблено відповідний спеціалізований алгоритм автоматизованого відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії, що забезпечує можливість подальшої програмної реалізації запропонованої компоненти, та здійснення комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії в автоматизованому режимі. Здійснено практичну апробацію розробленої компоненти на прикладі розв'язання експериментальної прикладної практичної задачі відбору нових кандидатів для формування релевантної групи нових користувачів існуючого програмного продукту (в якості прикладу такого програмного продукту було обрано інформаційно-довідкову систему людино-машинної взаємодії). Визначено шляхи подальших напрямів подальших досліджень щодо можливого розвитку, покращення, а також прикладного практичного використання розробленої компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії, як в контексті науково-прикладних та прикладних практичних задач проблематики автоматизації й інтелектуалізації людино-машинної взаємодії, так і загалом.

Ключові слова: людино-машинна взаємодія, автоматизація, інтелектуалізація, суб'єктивізація сприйняття, інтелектуальна компонента.

Pukach A., Teslyuk V. The intelligent component of automated candidate selection based on their polyfactor portraits of human-machine interaction objects' perception subjectivization. This research is devoted to solving the scientific and applied problem of automating the selection of relevant candidates for human-machine interaction teams taking into account their polyfactor portraits, which is part of the cluster of issues related to the scientific and applied problems of human-machine interaction automation and intellectualization. A corresponding specialized intelligent component of automated candidate selection based on their polyfactor portraits of human-machine interaction objects' perception subjectivization has been developed, which ensures possibility of solving the declared scientific and applied problem. A basic mathematical model of the declared component has been developed, which provides the possibility of modeling the researched processes of intelligent selection of candidates for human-machine interaction teams in an automated mode. A corresponding specialized algorithm for automating the selection of candidates for human-machine interaction teams has been developed, which provides the possibility of further software implementation of the proposed component, and computer modeling of the researched processes of intelligent selection of candidates for human-machine interaction teams in an automated mode. A practical approbation of the developed component has been carried out on the example of solving an experimental applied practical task of selecting new candidates to form a target group for an existing software product support team (as an example of one of the most common variants of the researched human-machine interaction). An analysis of potential areas of further research(es) has been performed regarding the possible development, improvement, and practical application of the developed component (of automated candidate selection based on their polyfactor portraits of human-machine interaction objects' perception subjectivization), both in the context of scientific-and-applied as well as the practical-applied tasks related to the issues of human-machine interaction automation and intellectualization, as well as in general.

Keywords: human-machine interaction, automation, intellectualization, perception subjectivization, intelligent component.

Постановка проблеми. Рівень комплексності та складності сучасних складових людино-машинної взаємодії в сфері інформаційних технологій (ІТ) продовжує зростати, що вимагає вдосконалення існуючих, а також розроблення нових механізмів дослідження релевантних процесів, щодо забезпечення можливостей конкурентного покращення досліджуваних кейсів цієї взаємодії.

Однією із варіантів дослідження бажаного об'єкту, є дослідження релевантних процесів відбору кандидатів – суб'єктів людино-машинної взаємодії, на основі певних критеріїв відбору,

Зокрема, авторами праці [1] вивчено, як ефективність команди IT-проекту (як однією з фундаментальних складових будь-якої людино-машинної взаємодії) впливає на її успішність, досліджено, де саме відбивається цей вплив на ефективність, та на що слід звернути особливу увагу при формуванні команди, та запропонована методологія відбору потенційного лідера проекту, що базується на оцінці наявних кандидатів за трьома компонентами: цінності, яких вони дотримуються, фінансовий рівень оплати їх праці, а також ризики, пов'язані з можливим невиконанням своїх функцій. Водночас, авторами іншої праці [2] досліджується проблематика оцінки ефективності команд людино-машинної взаємодії на прикладі дослідження різноманітних моделей зрілості команд, вивчаючи не лише загальнокомандні показники ефективності, але й індивідуальні параметричні показники кожного з членів цих команд. Разом з тим, автором роботи [3] реалізовано надзвичайно комплексне глибинне предметне дослідження проблематики краудсорсингу користувачко-центристських команд, що також має неабиякий вплив в контексті дослідження проблематики формування команд людино-машинної взаємодії.

Таким чином, проблематика формування команд людино-машинної взаємодії на основі відбору кандидатів за певними критеріями досі залишається надзвичайно актуальною і є, з одного боку, добре відомою, з усіма існуючими напрацюваннями, проте, разом з тим, з іншого боку – все ще вимагає додаткового вивчення саме в контексті уніфікації як аспектів механізмів полікритеріальних відборів, так і аспектів диференціації областей застосування людино-машинної взаємодії.

Зокрема, однією з релевантних актуальних задач – є науково-прикладна задача автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії, що входить до кластеру задач науково-прикладної проблематики автоматизації й інтелектуалізації людино-машинної взаємодії.

Аналіз останніх досліджень у публікацій. Здійснено комплексний аналіз праць в напрямку проблематики формування команд людино-машинної взаємодії на основі відбору кандидатів згідно певних, наперед задекларованих, критеріїв. До прикладу, в роботі [4] авторами запропоновані теоретичні основи для дослідження впливу втручання в розвиток і формування команд, щоб результати даного роду активностей могли бути більш підзвітними з точки зору концепцій і методів, аби мати можливість забезпечити більш послідовні результати, оскільки, на даному етапі, більшість емпірично отриманих результатів часто виявляються доволі суперечливими саме через брак широко узгодженої теоретичної конструкції. Водночас, авторами праці [5] здійснено дослідження, мета якого полягає в тому, щоб продемонструвати підхід до продуктивності, заснований на подіях, шляхом розробки та впровадження інтелектуальних коучингових (навчальних) агентів у структурі навчання формованої/досліджуваної команди за допомогою навчання під керівництвом, результаті якого авторам вдалось обґрунтовано досягнути позитивного впливу на продуктивність досліджуваної команди. В той час як, автором іншої роботи [6] досліджується проблематика лідерства та ефективності управління формованих команд IT-проектів, в тому числі в контексті методології інформаційно-комунікаційних технологій. Водночас, авторським колективом праці [7] досліджується комплексна проблематика щодо вивчення питань конфліктності та ефективності при формуванні команд за допомогою різних методологій.

Робота [8] висвітлює результати дослідження авторів, присвяченого вивченню загального процесу формування команд, де автора, також, концентрують свою увагу на проектуванні спеціалізованого програмного забезпечення, використовуючи в ньому переваги аналітики навчання, що дають змогу: завоювати довіру користувача до системи, а також допомогти користувачеві оцінити, чи запропоновані команди збалансовані, та які зміни слід внести (якщо такі є), і вже на основі отриманого досвіду – автори надають загальні рекомендації щодо розробки програмного забезпечення для формування команд, яке розкриває проблеми та можливості, особливо в поєднанні з аналітикою навчання. Разом з тим, авторами праці [9] запропоновано використовувати генетичний алгоритм, який дозволить знайти локальний екстремум, який буде оптимальним в поточних умовах проекту для вирішення багатокритеріальної задачі формування команди проекту, адже це зменшить суб'єктивну складову в процесі прийняття проектних рішень, що в свою чергу підвищить ймовірність успішного завершення IT-проектів в умовах невизначеності та динамічних змін, і врешті запропонує рішення щодо кількісного та компетентного складу команди проекту.

Водночас, авторами роботи [10] запропоновано метод формування команд на основі графа обмежених шаблонів, який, на відміну від традиційних методів, враховує як структурні обмеження, так і комунікаційні обмеження членів команди, що може краще задовольнити вимоги користувачів, саме в контексті соціальних мереж як джерела кандидатів для формування досліджуваних команд.

В той час як авторським колективом іншої праці [11] запропоновано структуру формування команди, відкориговану релевантністю завдань (які вирішуватиме формована команда), шляхом поєднання глобальної згрупованості з локальним відокремленням, забезпечуючи точність, різноманітність та ефективність формування команди на основі гетерогенної мережі співпраці, а також спеціалізованого методу на основі цієї гетерогенної мережі співпраці, призначеного для подолу формованої команди на складові реалізації тих чи інших конкретних завдань.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Існуючі методи та моделі відбору кандидатів та формування команд, як в контексті людино-машинної взаємодії, так і взагалому, можуть бути вузькоспеціалізованими та враховувати окремі параметричні показники чи характеристики кандидатів. Водночас, не існує єдиного універсального інструментарію, який би забезпечив можливість дослідження процесів відбору кандидатів та формування команд (як в контексті людино-машинної взаємодії, так і взагалому) з врахуванням будь-яких наперед задекларованих характеристик кандидатів, з однаковим степенем толерантності щодо опрашування тих чи інших конкретних показників. Таким чином, постає необхідність в розробленні такого рішення, одним із варіантів реалізації якого є можливість відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії, де, власне, саме поліфакторні портрети – репрезентують відповідні характеристики кандидатів (з наперед узгодженої/заданої множини) безвідносно їх функціонально-смислового навантаження, а натомість – в єдино спільному ключі суб'єктивізації сприйняття об'єкта спільної взаємодії усіх кандидатів, що забезпечило б можливість підсилення, в такий спосіб, внутрішнього рівня синергії формованих команд, де в їх учасників було б спільне суб'єктивне бачення та/або сприйняття об'єкта їх командної взаємодії в рамках усталеної об'єктно-центричної системи чи середовища цієї взаємодії.

Мета дослідження полягає в розробленні інтелектуальної компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії, що забезпечить можливість вирішення задекларованої науково-прикладної задачі автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії з врахуванням їх поліфакторних портретів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблення задекларованої інтелектуальної компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії реалізовано у кілька етапів, детально описаних далі по тексту.

Зокрема, базовим етапом є отримання поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єкта досліджуваної людино-машинної взаємодії, які являються обов'язковими необхідними вхідними даними для забезпечення можливості подальшого розроблення задекларованої компоненти. Отже, з метою отримання необхідних поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття досліджуваних кандидатів – запропоновано використати метод, представлений в роботі [12], що забезпечує можливість ідентифікації таких портретів суб'єктів на основі попередньо задекларованої множини релевантних факторів впливу. Таким чином, задекларувавши: об'єкт досліджуваної людино-машинної взаємодії; суб'єктів цієї людино-машинної взаємодії; а також множину факторів впливу на суб'єктивізацію сприйняття кожним із цих суб'єктів – об'єкта людино-машинної взаємодії, отримаємо необхідні поліфакторні портрети суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії – суб'єктами, тобто кандидатами для відбору у формовану команду.

Наступним етапом є розроблення базової математичної моделі задекларованої компоненти, що забезпечить можливість моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії (на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єкта цієї взаємодії) в автоматизованому режимі.

Вираз (1) нижче репрезентує поліфакторний портрет (суб'єктивізації сприйняття об'єкта людино-машинної взаємодії) кандидата (суб'єкта цієї ж взаємодії).

$$IndPFPSub_{\lambda}^{o|} = \left[Fct_{|1|}, Fct_{|2|}, \ldots Fct_{|kom|}\right], \tag{1}$$

де: $IndPFPSub_{\lambda}^{o|}$ – індивідуальний поліфакторний портрет суб'єктивізації сприйняття λ-им суб'єктом o-ого об'єкта в рамках їх спільної людино-машинної взаємодії; $Fct_{|1|}$ – частка впливу 1-

ого фактора впливу (на суб'єктивізацію сприйняття досліджуваного об'єкта людино-машинної взаємодії) в рамках поточного поліфакторного портрету досліджуваного суб'єкта; Fct_{fact_n} – частка впливу останнього (з попередньо задекларованої множини) фактора впливу (на суб'єктивізацію сприйняття досліджуваного об'єкта людино-машинної взаємодії) в рамках поточного поліфакторного портрету досліджуваного суб'єкта, *fact* – кількість попередньо задекларованих факторів впливу, в рамках поточного досліджуваного кейсу суб'єктивізації сприйняття об'єкта(-ів) людино-машинної взаємодії.

Водночас, вираз (2) репрезентує узагальнену логічну функцію відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії:

$$SelectFunc\left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|}, Crit_{c|}\right) = \begin{cases} true, \left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|} \subset Crit_{|c|}\right) \\ false, \left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|} \not\subset Crit_{|c|}\right) \end{cases} \quad (2)$$

де: $SelectFunc\left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|}, Crit_{|c|}\right)$ – логічна функція відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів, вхідними аргументами якої є поліфакторний портрет досліджуваного суб'єкта (кандидата), а також певний конкретний критерій відбору (з множини наперед узгоджених та задекларованих), а вихідними значеннями – відповідно *«true»* або *«false»*. $true, \left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|} \subset Crit_{|c|}\right)$ – результат функції *«true»* (при якому поліфакторний портрет кандидата задовольняє наявний критерій відбору), що репрезентує позитивне рішення щодо відбору кандидата. $false, \left(IndPFPSub_{|s|}^{|c|} \not\subset Crit_{|c|}\right)$ – результат функції *«false»* (при якому поліфакторний портрет кандидата не задовольняє наявний критерій відбору), що репрезентує негативне рішення щодо відбору кандидата.

Разом з тим, параметр критерію відбору кандидата є відносною та/або змінюваною величиною, тобто може бути репрезентований різноманітними варіантами, в залежності від потреб кожної окремо взятої цілі або мети досліджуваної задачі відбору.

До прикладу, вираз (3) нижче репрезентує в якості критерію відбору кандидата – ідентифікацію порогового відхилення суми абсолютної величини різниці часток впливу (по кожному із факторів впливу) між поліфакторним портретом кандидата та певним «еталонним» (або бажаним) поліфакторним портретом деякого узагальненого «еталонного» кандидата:

$$Crit_{example} = \sum_{f=1}^{fact} \left(\left| IndPFPSub_{|s|}^{|c|}\left[Fct_{f|}\right] - EtalSub_{|s|}^{|et|}\left[Fct_{f|}\right] \right| \right) \leq \Delta_{thr}, \quad (3)$$

де: $IndPFPSub_{|s|}^{|c|}\left[Fct_{f|}\right]$ – частка впливу *f*-ого фактора впливу поліфакторного портрета поточного кандидата відбору; $EtalSub_{|s|}^{|et|}\left[Fct_{f|}\right]$ – частка впливу *f*-ого фактора впливу поліфакторного портрета «еталонного» кандидата відбору; Δ_{thr} – значення порогового відхилення суми абсолютної величини різниці часток впливу (по кожному із факторів впливу) між поліфакторним портретом поточного кандидата та «еталонного» кандидата.

Таким чином, у випадку прикладу критерію відбору, представленого вище виразом (3), будь-яке додатне (більше нуля) значення критерію свідчитиме про негативний результат відбору, в той час як будь-яке від'ємне, або ж нульове, значення критерію свідчитиме про позитивний результат відбору.

Отже, вирази (1)-(3), фактично, репрезентують розроблену базову математичну модель задекларованої компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії.

Наведений приклад критерію відбору є лише одним із багатьох можливих варіантів. Проте, особливістю (та, відповідно, перевагою) розробленої базової математичної моделі задекларованої компоненти (автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії) є, якраз, те, що критерій відбору

представлений у ній в якості окремої незалежної складової, тож, відповідно, може містити те конкретне значення, яке необхідне при розв'язанні тієї чи іншої конкретної задачі відбору.

Наступним етапом розроблення задекларованої інтелектуальної компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії – є розроблення відповідного спеціалізованого алгоритм автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії, блок-схема якого, зокрема, подана нижче, на рисунку 1.

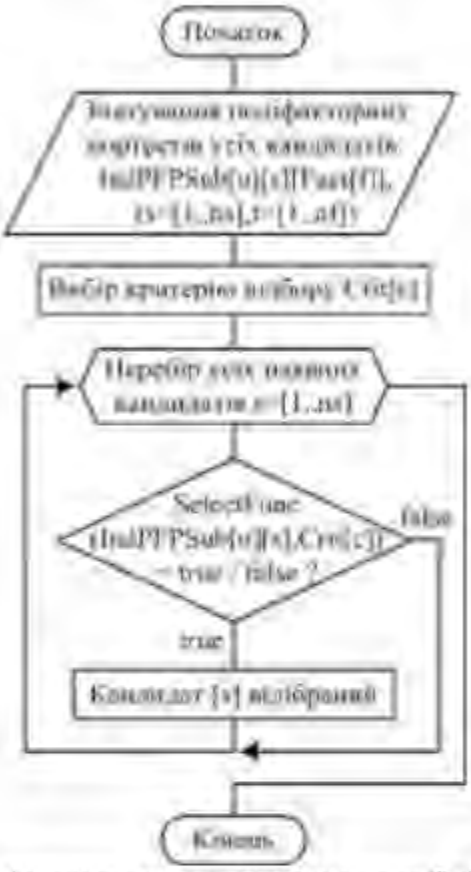


Рис. 1. Блок-схема спеціалізованого алгоритму автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії

Основним призначенням та особливістю розробленого спеціалізованого алгоритму є забезпечення можливості подальшої програмної реалізації запропонованої компоненти, та здійснення комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії в автоматизованому режимі, в тому числі з врахуванням різноманітних можливих критеріїв відбору.

Фінальним етапом розроблення задекларованої інтелектуальної компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх поліфакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії – є, власне, її практична апробація на прикладі розв'язання релевантної прикладної задачі.

Зокрема, в рамках даного дослідження, здійснено практичну апробацію розробленої компоненти на прикладі розв'язання експериментальної прикладної практичної задачі відбору нових кандидатів для формування резервної групи (команди) вже існуючої команди супроводу програмного продукту (в якості прикладу одного з найрозповсюдженіших варіантів досліджуваної людино-машинної взаємодії).

Розв'язання поставленої прикладної практичної задачі реалізовано у три етапи. Першим етапом є зчитування поліфакторних портретів членів існуючої команди. Другим етапом є зчитування поліфакторних портретів усіх наявних кандидатів для формування резервної команди. Третім етапом є відбір (за допомогою розробленої інтелектуальної компоненти) максимально наближеного кандидата (з числа претендентів) до кожного із членів існуючої команди. Таким

чином, на виході нову (резервну) команду (з відібраних кандидатів) – альтернативну існуючій за рахунок максимальної наближеності їх чисел (існуючої та новостворюваної команди).

Нижче, на рисунку 2, подано графічну візуалізацію полі факторних портретів членів існуючої команди супроводу програмного продукту.

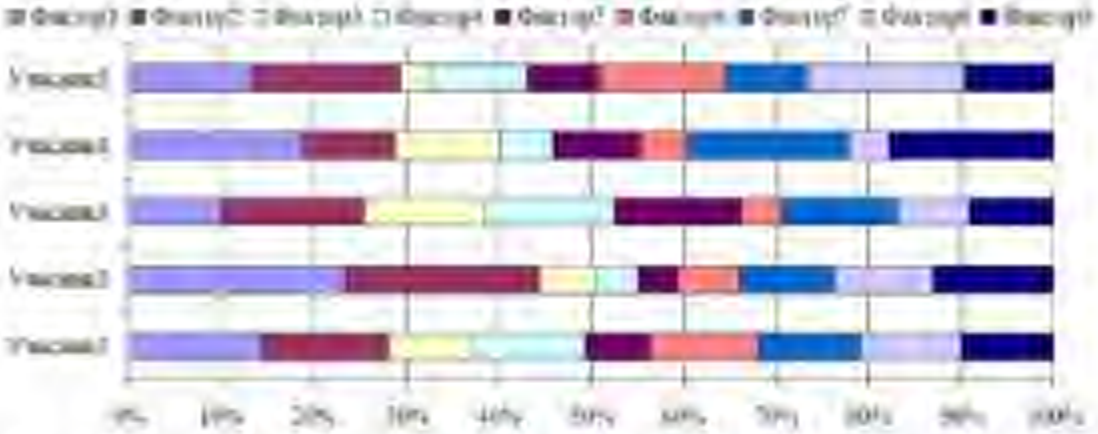


Рис. 2. Графічна візуалізація полі факторних портретів членів існуючої команди супроводу

Водночас, на рисунку 3 нижче подано графічну візуалізацію полі факторних портретів усіх наявних для відбору кандидатів.

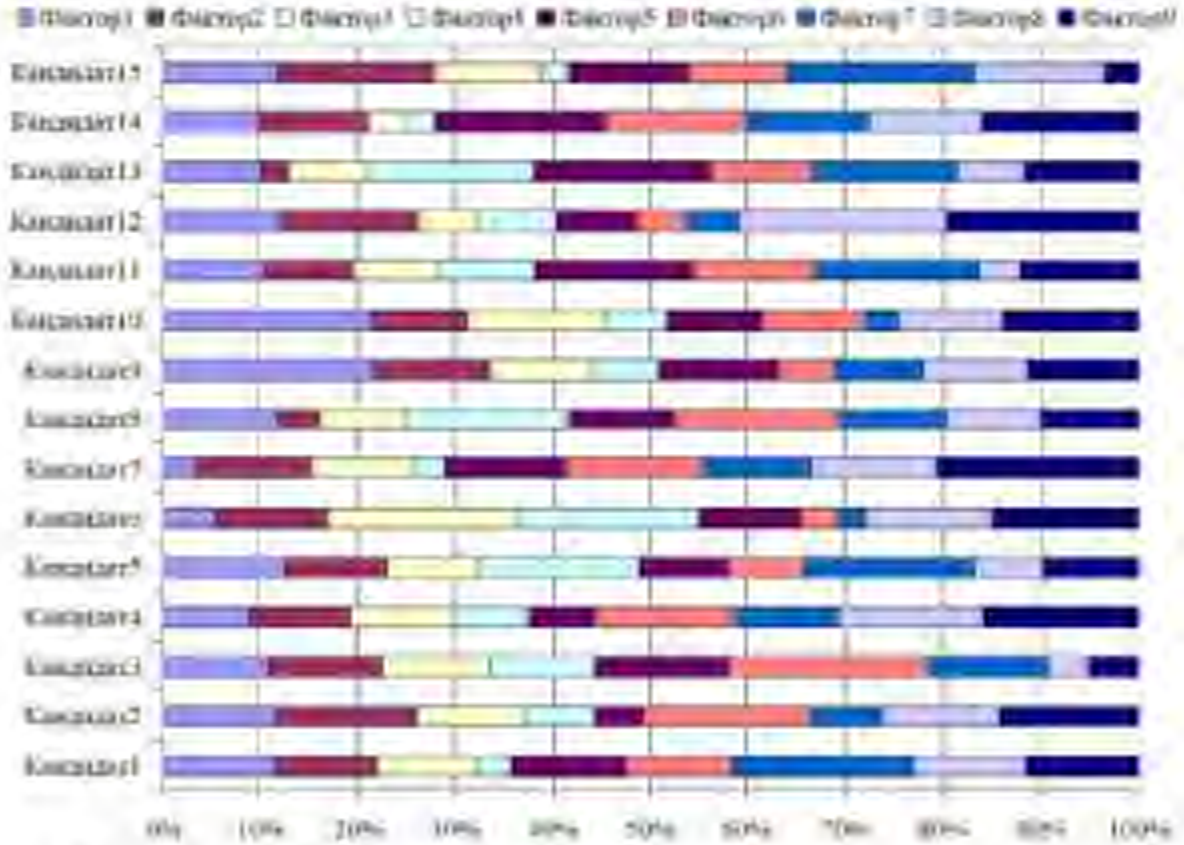


Рис. 3. Графічна візуалізація полі факторних портретів усіх наявних для відбору кандидатів

На завершення, рисунок 4 нижче демонструє результат розв'язання поставленої прикладної практичної задачі – тобто відібраних кандидатів, в якості резервної команди супроводу програмного продукту.

Таким чином, за допомогою розробленої інтелектуальної компоненти автоматизованого відбору кандидатів на основі їх полі факторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів

людино-машинної взаємодії – розв'язано прикладну практичну задачу відбору нових кандидатів для формування резервної групи вже існуючої команди супроводу програмного продукту.

Отримані результати підтверджують дієвість та ефективність розробленої інтелектуальної компоненти при вирішенні даного класу прикладних практичних задач, що підтверджує позитивну практичну апробацію задекларованої компоненти, та фіналізує повний цикл її розроблення в рамках даного дослідження.

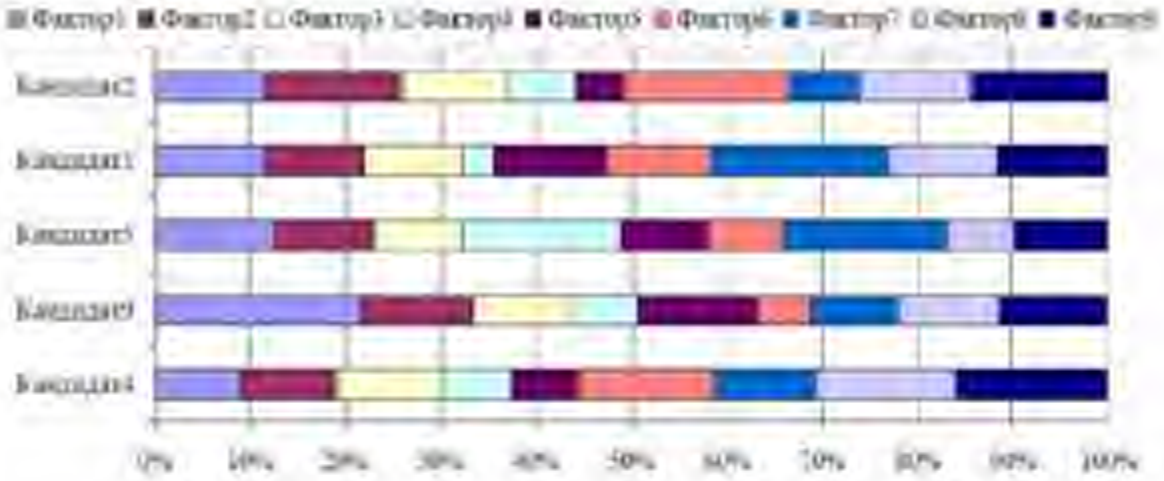


Рис. 4. Графічна візуалізація полефакторних портретів відібраних кандидатів

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблено інтелектуальну компоненту автоматизованого відбору кандидатів на основі їх полефакторних портретів суб'єктивізації сприйняття об'єктів людино-машинної взаємодії, що забезпечує можливість розв'язання науково-прикладної задачі автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії, що входить до кластеру задач науково-прикладної проблематики автоматизації й інтелектуалізації людино-машинної взаємодії. Розроблено базову математичну модель задекларованої компоненти, що забезпечує можливість моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії в автоматизованому режимі. Розроблено відповідний спеціалізований алгоритм автоматизації відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії, що забезпечує можливість подальшої програмної реалізації запропонованої компоненти, та здійснення комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів інтелектуального відбору кандидатів команд людино-машинної взаємодії в автоматизованому режимі. Здійснено практичну апробацію розробленої компоненти на прикладі розв'язання експериментальної прикладної практичної задачі відбору нових кандидатів для формування резервної групи вже існуючої команди супроводу програмного продукту (в якості прикладу одного з найрепрезентованіших варіантів досліджуваної людино-машинної взаємодії).

В якості перспектив подальших досліджень бачимо потенціал застосування розробленої компоненти для дослідження спектру релевантних прикладних практичних задач, пов'язаних з відбором кандидатів з найрізноманітніших команд, де ключовим і пріоритетним критерієм є особливості суб'єктивізації сприйняття кандидатами певних спільних об'єктів чи процесів. Крім того, бачимо перспективу подальшого розвитку запропонованого підходу в поєднанні з іншими властивостями, характеристиками, чи особливостями кандидатів, такими як, до прикладу: їх психотипи, соціотипи, ментальні сильності, комунікативні навички, особливості конфліктності, та багатьох інших, що лежать не лише в площині людино-машинної взаємодії, але й далеко по-за її межами, включаючи, зокрема, такі відомі та перспективні напрями як соціоніка, психологічна кібернетика, соціальна інженерія, та багатьох інших проявів міжсуб'єктної взаємодії.

Список бібліографічних посилань:

1. Kubenko, M. & Bolbo, Y. (2021). Features of Forming a Successful IT Project Team and Method of Team Leader Choosing. Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021), 2851:23), 1–11. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper23.pdf (дата зв.: 18.04.2025).
2. Sarıkaya, E., & Güney, S. (2024). Classification of scrum based on production, goal and performance in scrum implementing scrum framework. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39(1), 2113-2124. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1126103

3 Vinella, F. L. (2024). Crowdsourcing User-Centered Teams. SIKS Dissertation Series. Utrecht University. 227 p. https://doi.org/10.33540/2419
4 Perwira, I. T. & Widiandani, I.G.D. (2022). Are Team Building Interventions Still Relevant?. Psikostudia Jurnal Psikologi. 11(4). 526-531. http://dx.doi.org/10.30872/psikostudia.v11i4
5 Betrand, C.U., Anigbogu, S.O., Ekwealor, O.U. & Orji, I.M. (2022). Intelligent Coaching Agent for Enhancing Proactive Behaviors in Human Teamwork Using Supervised Learning Algorithm. American Journal of Artificial Intelligence. 6(1), 1-9. https://doi.org/10.11648/j.ajai.20220601.11
6 Ismael, Z. N. (2022). Project Team Management: The significance of various leadership approaches in work environments when managing ICT project teams. International Journal of Advanced Engineering, Management and Science. 8(11), 01-15. https://doi.org/10.22161/ijaems.811.1
7 Balawi, S., Youssef, A. & Elmasry, Y. (2023). Impact of Team Formation Methodology on Team's Conflict and Effectiveness. Proceedings of the 2023 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference University of North Texas, Denton, TX. 1-9. https://doi.org/10.18260/1-2-1153-46335
8. Hur, B., Adeyemi, O., de Vet, M., Takasaki, C., & Marshtnew, B. (2022). Design Guidelines for a Team Formation and Analytics Software. Proceedings of the 14th International Conference on Computer Supported Education. 504–513. https://doi.org/10.5220/0011138000003182
9 Blyzniukova, I., Teslenko, P. (2023). Formation of a minimum viable IT project team using the genetic algorithm. Technology Audit and Production: Reserves. 2 (2 (70)). 6–10. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277930
10. Kou, Y. et al. (2020). Efficient Team Formation in Social Networks based on Constrained Pattern Graph. 2022 IEEE 38th International Conference on Data Engineering (ICDE). 889–900. https://doi.org/10.1109/icde48307.2020.00082
11. Kou, Y. et al. (2025). Experts2team: Task Relevance Induced Team Formation by Combining Global Cohesion with Local Decoupling. Conference: the 30th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA 2025). 1-16. URL: https://www.researchgate.net/publication/389255653_Experts2team_Task_Relevance-Induced_Team_Formation_by_Combining_Global_Cohesion_with_Local_Decoupling (дата звернення: 08.04.2025)
12. Pukach, A. I., & Teslyuk, V. M. (2025). Method of forming multifactor portraits of the subjects supporting software complexes, using a multilayer perceptron. Radio Electronics, Computer Science, Control. (1), 130–141. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-12

References:

1. Kutsenko, M. & Boiko, Y. (2021). Features of Forming a Successful IT Project Team and Method of Team Leader Choosing. Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021). 2851(23). 1-11. URL: https://ceur-ws.org/Vol-2851/paper23.pdf (дата звернення: 08.04.2025)
2 Sarikaya, E., & Gürsev, S. (2024). Classification of teams based on production, goal and performance in teams implementing scrum framework. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 39(4). 2113–2124. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1128383
3 Vinella, F. L. (2024). Crowdsourcing User-Centered Teams. SIKS Dissertation Series. Utrecht University. 227 p. https://doi.org/10.33540/2419
4 Perwira, I. T. & Widiandani, I.G.D. (2022). Are Team Building Interventions Still Relevant?. Psikostudia Jurnal Psikologi. 11(4). 526-531. http://dx.doi.org/10.30872/psikostudia.v11i4
5. Betrand, C.U., Anigbogu, S.O., Ekwealor, O.U. & Orji, I.M. (2022). Intelligent Coaching Agent for Enhancing Proactive Behaviors in Human Teamwork Using Supervised Learning Algorithm. American Journal of Artificial Intelligence. 6(1), 1-9. https://doi.org/10.11648/j.ajai.20220601.11
6 Ismael, Z. N. (2022). Project Team Management: The significance of various leadership approaches in work environments when managing ICT project teams. International Journal of Advanced Engineering, Management and Science. 8(11), 01-15. https://doi.org/10.22161/ijaems.811.1
7 Balawi, S., Youssef, A. & Elmasry, Y. (2023). Impact of Team Formation Methodology on Team's Conflict and Effectiveness. Proceedings of the 2023 ASEE Gulf-Southwest Annual Conference University of North Texas, Denton, TX. 1-9. https://doi.org/10.18260/1-2-1153-46335
8. Hur, B., Adeyemi, O., de Vet, M., Takasaki, C., & Marshtnew, B. (2022). Design Guidelines for a Team Formation and Analytics Software. Proceedings of the 14th International Conference on Computer Supported Education. 504–513. https://doi.org/10.5220/0011138000003182
9 Blyzniukova, I., Teslenko, P. (2023). Formation of a minimum viable IT project team using the genetic algorithm. Technology Audit and Production: Reserves. 2 (2 (70)). 6–10. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277930
10. Kou, Y. et al. (2020). Efficient Team Formation in Social Networks based on Constrained Pattern Graph. 2022 IEEE 38th International Conference on Data Engineering (ICDE). 889–900. https://doi.org/10.1109/icde48307.2020.00082
11. Kou, Y. et al. (2025). Experts2team: Task Relevance-Induced Team Formation by Combining Global Cohesion with Local Decoupling. Conference: the 30th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA 2025). 1-16. URL: https://www.researchgate.net/publication/389255653_Experts2team_Task_Relevance-Induced_Team_Formation_by_Combining_Global_Cohesion_with_Local_Decoupling (дата звернення: 08.04.2025)
12. Pukach, A. I., & Teslyuk, V. M. (2025). Method of forming multifactor portraits of the subjects supporting software complexes, using a multilayer perceptron. Radio Electronics, Computer Science, Control. (1), 130–141. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-1-12

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-23
УДК 004.65
Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0003-2516-045X
Повстина Юлія Славомирівна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-5426-4157
Гуліна Наталія Михайлівна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0001-9282-4880
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

UML-АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ СКЛАДСЬКОГО ОБЛІКУ АВТОЗАПЧАСТИН

Самчук Л. М., Повстина Ю. С., Гуліна Н. М. UML-аналіз та розробка інформаційної системи складського обліку автозапчастин. Робота присвячена розробці інформаційної системи «Управління складом з автомобільними запчастинами» з використанням Уніфікованої мови моделювання (UML). У дослідженні проведено аналіз функціональних можливостей системи за допомогою основних UML-діаграм: діаграми варіантів використання, діаграми класів, діаграми послідовності та діаграми діяльності. Діаграми відображають взаємодію користувачів із системою, структуру даних, послідовність процесів та бізнес-логіку управління запасами. Визначено п'ять ключових акторів (менеджер, адміністратор, клієнт, постачальник, покупець) та їхні ролі в системі. Розроблена модель сприяє автоматизації складських операцій, оптимізації управління запасами та підвищенню ефективності логістичних процесів. Результати роботи можуть бути застосовані для покращення складської логістики та якості обслуговування в сфері торгівлі автозапчастинами, особливо в умовах економічних і логістичних викликів в Україні.

Ключові слова: UML-діаграми, інформаційна система, складський облік, автозапчастини, діаграма класів, автоматизація складу, архітектура програмного забезпечення, логістика.

Samchuk L., Povstina Y., Hulina N. UML-analysis and development of an information system for warehouse accounting of auto parts. The work is devoted to the development of an information system «Management of a warehouse with auto parts» using the Unified Modeling Language (UML). The study analyzed the functional capabilities of the system using the main UML diagrams: use case diagrams, class diagrams, sequence diagrams and activity diagrams. These diagrams reflect the interaction of users with the system, data structure, sequence of processes and business logic of inventory management. Five key actors (manager, administrator, client, supplier, logistician) and their roles in the system were identified. The developed model contributes to the automation of warehouse operations, optimization of inventory management and increasing the efficiency of logistics processes. The results of the work can be applied to improve warehouse logistics and service quality in the auto parts trade, especially in the context of economic and logistical challenges in Ukraine.

Keywords: UML diagrams, information system, warehouse accounting, auto parts, class diagram, warehouse automation, software architecture, logistics.

Постановка наукової проблеми. Останнім часом управління складами автомобільних запчастин стає все більш актуальним через зростання попиту на швидку доставку та якісний сервіс. Впровадження автоматизованих систем управління складом (WMS) допомагає оптимізувати складські процеси, скоротити час обробки замовлень і мінімізувати втрати від псування товарів [1]. Підприємства часто стикаються з проблемами надлишку одних товарів і нестачі інших, що призводить до зайвих витрат. Наприклад, причиною пересортування можуть полягати в тому, що в обліку помилково відображено відпуск одного товару замість іншого схожого з ним, що призводить до розбіжностей між даними бухгалтерського обліку та фактичними залишками товарів [2]. Автоматизація допомагає зменшити кількість трудових ресурсів, заморожених у запасах, раціоналізувати складський простір та оптимізувати використання обладнання, техніки і персоналу, що сприяє зниженню витрат і підвищенню продуктивності [3].

Інформаційні системи відіграють ключову роль у контролі якості та терміну придатності автозапчастин. Вони забезпечують можливість відстежувати стан запасів у реальному часі, що дозволяє оперативно виявляти дефектні або застарілі деталі та своєчасно вилучати їх з обігу. Це не лише запобігає фінансовим втратам, але й підтримує позитивну репутацію компанії, підвищуючи довіру клієнтів. В умовах війни в Україні бізнес, зокрема у сфері автозапчастин та логістики, зіткнувся з низкою викликів, які потребують швидкої адаптації та впровадження нових технологій. Війна призвела до значних порушень у логістичних ланцюгах. Руйнування інфраструктури, включаючи дороги, мости та залізничні лінії, ускладнило перевезення вантажів як усередині країни, так і на міжнародному рівні. Блокування транспортних шляхів змушує компанії шукати альтернативні способи доставки, що призводить до збільшення часу доставки та зростання витрат на транспортування [4].

Багато компаній втратили склади через бойові дії, що призвело до необхідності перенесення запасів у західні регіони та пошуку нових логістичних рішень [5]. Крім того, мобілізація та безпекові ризики призвели до нестачі водіїв та іншого персоналу, що ускладнює виконання операційних завдань і знижує ефективність роботи підприємств. Компанії змушені швидко навчати нових працівників, що потребує додаткових фінансових та часових ресурсів.

Аналіз досліджень. Автори статті [6] досліджують проблему неефективності обробки даних у компанії Auto Body Repai Enterprise, яка спеціалізується на ремонті та обслуговуванні автомобілів, особливо тих, що постраждали від аварій чи катастроф. Основна проблема полягає у використанні фізичних форм для обробки даних, що призводить до значних витрат часу, праці та ресурсів, а також до затримання у наданні інформації через відсутність інтеграції між різними підрозділами компанії. Їхній аналіз демонструє, що поточна система з повторним введенням даних у кожному відділі спричиняє неефективність, знижує точність і ускладнює швидке прийняття рішень, що є критичним у конкурентному бізнес-середовищі.

Для вирішення цієї проблеми автори пропонують розробку інтегрованої системи ремонту транспортних засобів із застосуванням agile-методології, зокрема моделі Extreme Programming (XP), яка забезпечує швидку, адаптивну розробку з активною участю користувачів. Аналіз авторів показує, що використання XP дозволяє створити систему, яка усуває дублювання даних, забезпечує швидке створення звітів і моніторинг діяльності всіх підрозділів, підключених до єдиного серверу компанії. Це підвищує ефективність і точність управління інформацією, сприяє оптимізації бізнес-процесів і підтримує зростання компанії в динамічних умовах, відповідаючи потребам користувачів у реальному часі.

Автори статті [7] досліджують проблему неефективного управління складськими процесами у компанії Zaeni Convection, яка займається постачанням конвекційних продуктів у Бандунгу, Індонезія. Основна проблема полягає у використанні ручних методів для обліку сировини, виробництва та розподілу готової продукції, що призводить до помилок у розрахунках сировини, відсутності звітів про інвентаризацію та складнощів із централізованим зберіганням даних. Їхній аналіз демонструє, що відсутність автоматизації ускладнює регулювання руху товарів, призводить до невідповідностей між потребами виробництва та наявними запасами, а також уповільнює процес звітування, що перешкоджає ефективному управлінню бізнесом.

Для вирішення цієї проблеми автори пропонують розробку інформаційної системи управління складом (WMIS) з використанням методології Rapid Application Development (RAD) та об'єктно-орієнтованого підходу з інструментами UML. Аналіз авторів показує, що впровадження такої системи дозволяє автоматизувати облік сировини, закупівлі, виробництва та управління готовою продукцією, забезпечуючи автоматичні розрахунки потреб у матеріалах, централізоване зберігання даних і швидке створення звітів. Це сприяє оптимізації бізнес-процесів, усуває помилки, пов'язані з ручним введенням даних, і забезпечує ключових учасників — власника, складську службу та менеджера виробництва — актуальною інформацією для прийняття рішень, що підвищує загальну ефективність компанії.

Автор статті [8] досліджує проблему неефективного обліку складських запасів у вагонному депо VChD-2 компанії JSC «Uztemiryolyobovchi» в залізничному транспорті Узбекистану. Основна проблема полягає у відсутності автоматизації процесів управління складом, що ускладнює облік товарів і матеріалів, необхідних для швидкого обслуговування та ремонту рухомого складу (вагонів). Його аналіз показує, що ручне ведення обліку призводить до затримок у забезпеченні запасами, ускладнює моніторинг стану складу в реальному часі та перешкоджає оперативному прийняттю управлінських рішень. Для вирішення цієї проблеми автор пропонує розробку автоматизованої інформаційної системи управління складом із використанням UML-діаграм (діаграми використання та класів) для моделювання структури та взаємодії між користувачами й системою. Аналіз автора демонструє, що впровадження такої системи, яка включає створення бази даних і розробку програмного забезпечення, дозволяє оптимізувати облік складських запасів, автоматизувати реєстрацію надходження та витрат товарів, а також генерувати накладні в реальному часі. Це сприяє підвищенню ефективності логістичних процесів, забезпечує своєчасне поповнення складу та покращує управління пасажирськими перевезеннями завдяки швидкому доступу до актуальних даних.

Мета роботи. Розробити UML-моделі та інформаційну систему складського обліку автозапчастин для оптимізації процесів управління запасами, контролю залишків і автоматизації облікових операцій

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Незважаючи на розвиток сучасних технологій, підприємства, що займаються зберіганням та розподілом автомобільних запчастин, часто стикаються з проблемами неефективного управління складськими запасами. Відсутність чіткої взаємодії між різними користувачами, неточність обліку товарів та затримки в оновленні інформації створюють ризик перевитрат, збоїв у постачанні та зниження якості обслуговування. Саме такі проблеми спонукають до розробки інноваційних рішень, які інтегрують усі етапи логістичного процесу від прийому товару до його доставки кінцевому споживачу. Представлено детальний аналіз функціональних можливостей системи управління складом з автомобільними запчастинами за допомогою UML-діаграм, який демонструє ключові аспекти взаємодії користувачів, внутрішню структуру системи та послідовність робочих процесів для вирішення вказаних проблем [9].

Діаграма випадків використання демонструє взаємодію системи з різними учасниками процесу та визначає основні функціональні можливості, які повинна забезпечувати інформаційна система. На представленій діаграмі (рис. 1) показано п'ять ключових акторів, які взаємодіють із системою управління складом. Менеджер відповідає за контроль термінів зберігання, аналіз залишків, перевірку якості запчастин, а також за створення заявок постачальнику й формування звітності. Його завдання полягає в ухваленні рішень щодо замовлень, плануванні поставок і розподілі товару по складських зонах. Кожна з цих дій відображена на діаграмі як окремий випадок використання системи, пов'язаний з актором «Менеджер».

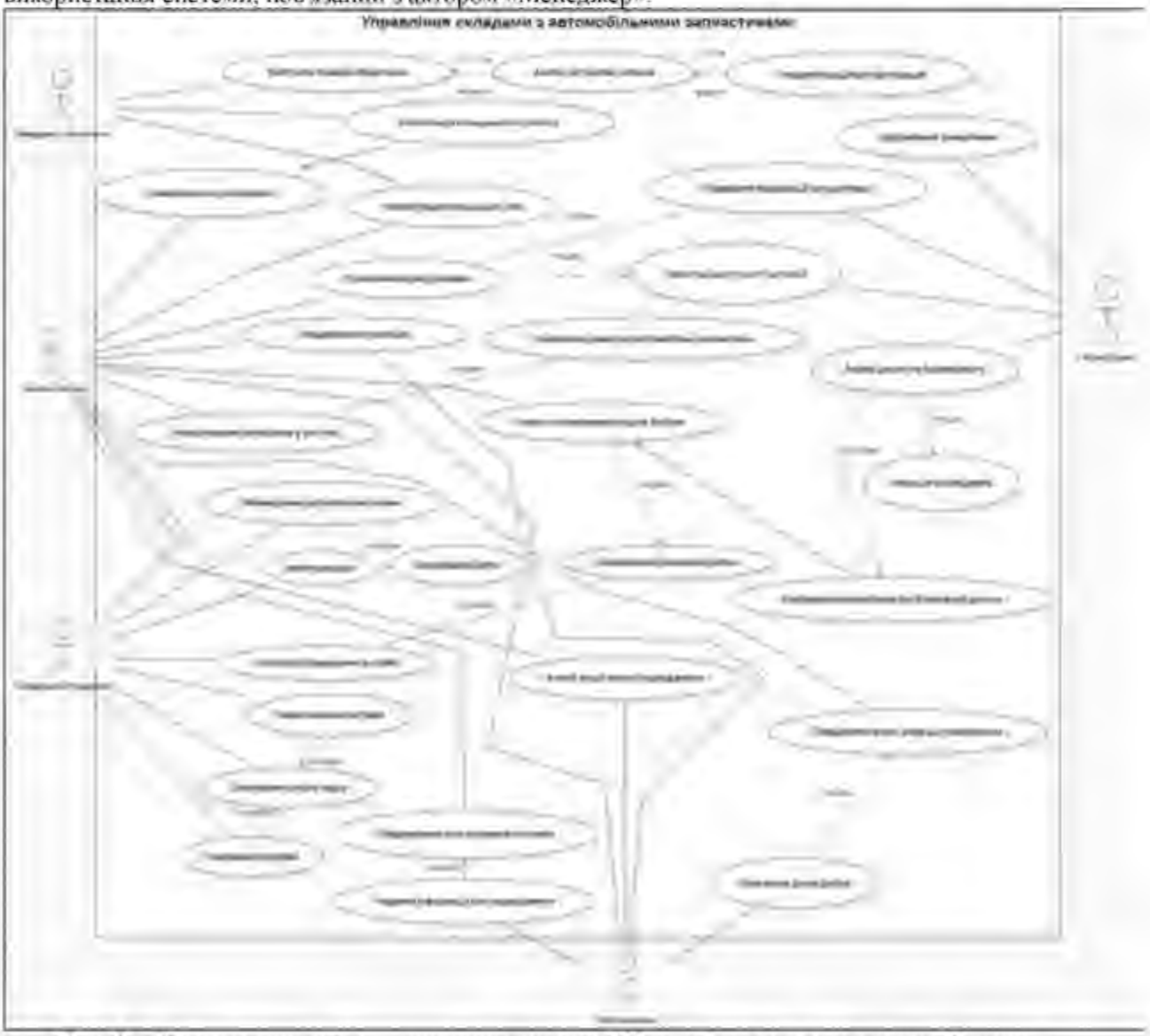


Рис. 1 – Діаграма випадків використання системи "Управління складом з автомобільними запчастинами"

Адміністратор керує користувачами, налаштовує права доступу, вносить зміни до системних параметрів та стежить за тим, щоб програмні інструменти для управління складом працювали коректно. Ця роль має особливі повноваження в системі, що дозволяє вносити ключові зміни до налаштувань та структури даних. Клієнт використовує систему переважно для пошуку запчастин, оформлення замовлень і повернень. Він має можливість відстежувати статус замовлення, звертатися до менеджера в разі виникнення питань або проблем і отримувати підтвердження про доставку чи наявність товару на складі. Візуально на діаграмі ці дії представлені як окремі випадки використання, пов'язані з актором «Клієнт». Постачальник отримує заявки від менеджера, забезпечує доставку запчастин, інформує про наявні або дефектні деталі та оформлює відповідні документи. Коли надходять нові товари, постачальник передає інформацію системі, щоб оновити дані про наявні деталі та їхній стан. Ця взаємодія є ключовою для забезпечення актуальності даних про складські запаси. Логістик відповідає за процеси фізичного переміщення деталей: приймання на склад, відвантаження, сканування штрих-кодів і перевірку стану товару під час транспортування. Він фіксує зміни в кількості чи місці зберігання запчастин, оформлює супровідну документацію, а також оновлює інформацію щодо дефекту чи пошкоджень. Всі ці дії є важливими для забезпечення точності обліку та своєчасності операцій. Система, окрім приймання та відвантаження деталей, передбачає також функції аналітики: аналіз потреб через повернення, оцінку втрат через пошкодження, контроль складських зон і формування звітів про залишки. Завдяки цим функціям менеджер та інші зацікавлені сторони можуть приймати обґрунтовані рішення щодо обсягів закупівлі, планування логістики та оптимізації складських процесів.

Діаграма класів (рис. 2) відображає структуру системи «Управління складом з автомобільними запчастинами» та показує, як ключові сутності взаємопов'язані між собою.

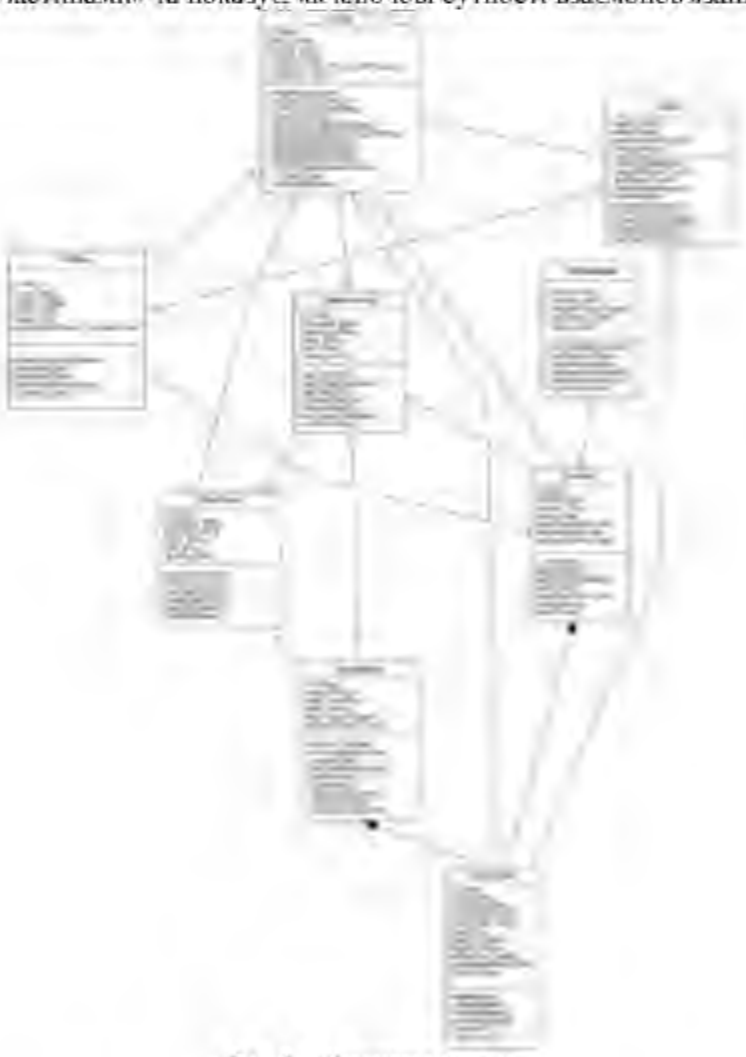


Рис.2 – Діаграма класів

У кожного класу вказані його атрибути та методи, а стрілки й лінії між класами ілюструють різні типи зв'язків: асоціацію, наслідування та інші відносини.

Клас «Склад» (Warehouse) містить базові атрибути: ідентифікатор, місце розташування, місткість та списки наявних запчастин й робітників. Серед методів класу є функції для додавання та вилучення запчастин, а також для обчислення вільного простору на складі. Таким чином, «Склад» виступає центральною точкою, де зберігаються всі деталі та де працюють робітники, які забезпечують функціонування системи. Клас «Робітник» є узагальненим батьківським класом і містить поля для зберігання інформації про ідентифікатор, ім'я, роль і прив'язку до складу. Його метод «update Inventory()» дає можливість оновлювати дані про наявні запчастини. Від «Робітника» наслідуються три спеціалізовані класи: «Адміністратор», «Менеджер» і «Логіст». Кожен з цих класів має свої специфічні атрибути та методи, які відповідають їхнім функціональним обов'язкам у системі.

Для управління процесами постачання та замовлення використовуються класи «Постачальник» і «Замовлення». «Постачальник» зберігає дані про свою назву, контактну інформацію та список запчастин, які може надати. Він має методи для взаємодії з системою та обробки замовлень. «Замовлення» фокусується на інформації про статус, дати оформлення й доставки, а також містить список замовлених запчастин і методи для додавання, видалення та обчислення вартості.

Клас «Клієнт» зберігає інформацію про особу, її контактні дані та перелік замовлень. За допомогою методів «placeOrder()» і «returnPart()» клієнт може здійснювати покупку запчастин або оформлювати повернення. Основною одиницею обліку в системі є клас «Запчастина», що має ідентифікатор, назву, кількість, ціну та опис. Його методи дозволяють змінювати вартість і перевіряти наявність деталей на складі. «Запчастина» пов'язана з декількома класами, адже вона переміщується від постачальника до складу й далі до клієнта.

Діаграма послідовності (рис. 3) ілюструє кроки взаємодії між користувачем, веб-клієнтом, сервером каталогу, базою даних, системою інвентаризації та системою замовлень. Вона показує хронологічну послідовність дій та обмін повідомленнями між учасниками процесу.

Рис. 3 – Діаграма послідовності інформаційної системи

Спочатку користувач авторизується в системі, надсилаючи запит із власними обліковими даними до веб-клієнта. Веб-клієнт передає цю інформацію на сервер каталогу, який звертається до бази даних для перевірки коректності логіна та пароля. Після успішної авторизації сервер каталогу повертає позитивну відповідь веб-клієнту, який відображає інтерфейс для подальшої роботи. Після входу в систему користувач може додавати запчастини до замовлення. Для цього він обирає потрібні товари, надсилає запит на створення замовлення, а сервер каталогу звертається до бази даних для збереження інформації. Після підтвердження від бази даних сервер надсилає відповідь веб-клієнту, який відображає оновлений інтерфейс із деталями замовлення. Аналогічним чином здійснюється процес додавання запчастин до інвентарю: користувач ініціює дію, веб-клієнт передає інформацію серверу, який звертається до системи інвентаризації. Система інвентаризації оновлює дані в базі даних і повертає підтвердження. Коли замовлення сформовано, система замовлень приймає дані і зберігає їх для подальшої обробки. Сервер каталогу передає інформацію до системи замовлень, отримує підтвердження і надсилає статус успішної операції веб-клієнту, який інформує користувача про завершення процесу.

Діаграма діяльності (рис. 4) демонструє послідовність кроків та логіку прийняття рішень у процесі управління замовленнями й запасами автомобільних запчастин. Вона розділена на блоки, кожен з яких відповідає окремому учаснику: Клієнт, Система, Складський працівник, Постачальник і Адміністратор.

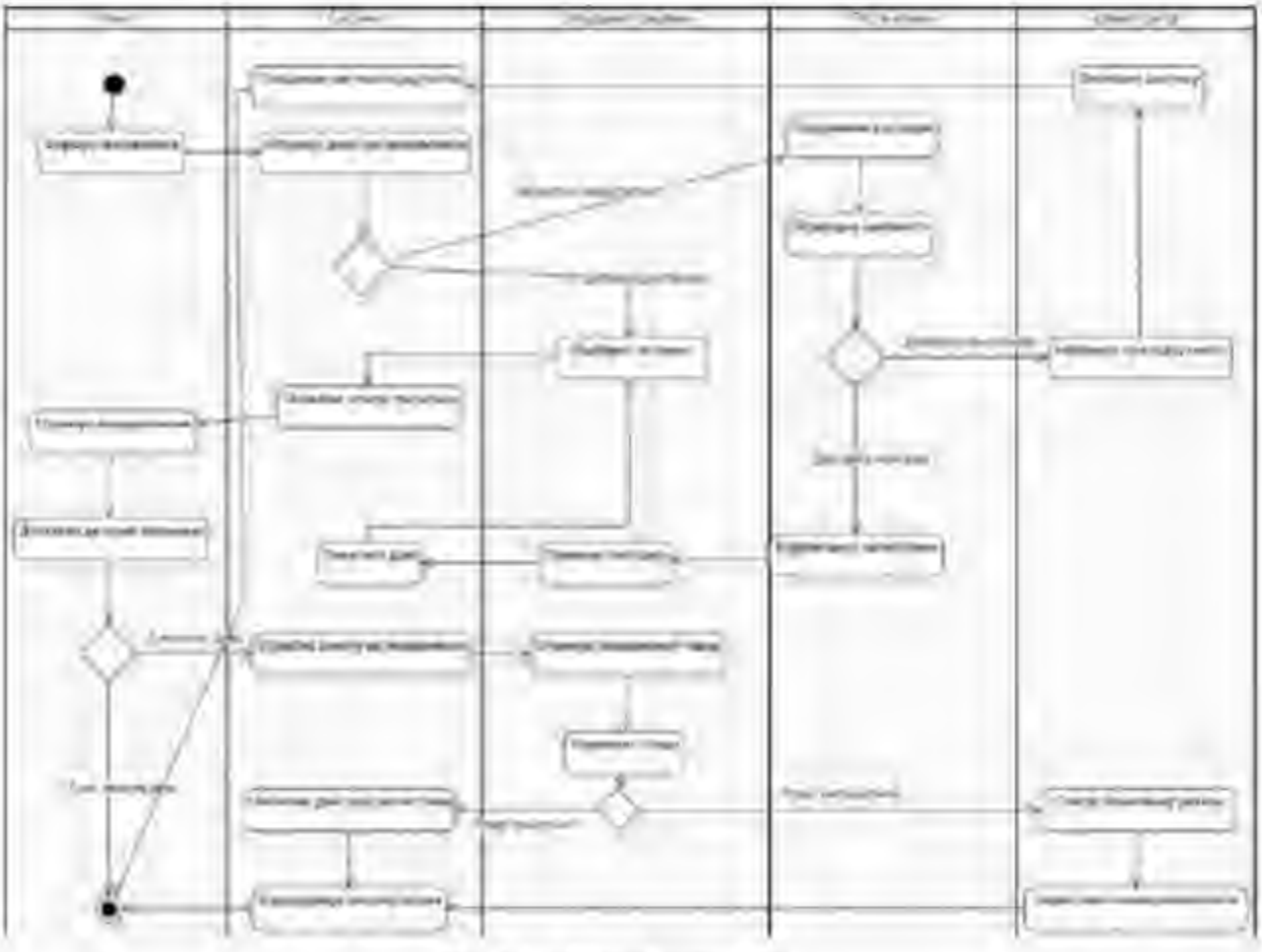


Рис. 4 – Діаграма діяльності

На початку процесу Клієнт формує замовлення в системі, після чого Система перевіряє наявність необхідних деталей на складі. Якщо запасів недостатньо, Система повідомляє Клієнта про відсутність товару і паралельно ініціює процес звернення до Постачальника для замовлення додаткових запчастин. Це розгалуження потоку дій відображено на діаграмі як точка прийняття рішення. У випадку наявності достатньої кількості товару Система переходить до оформлення

доставки. Складський працівник отримує повідомлення про нове замовлення і починає процес підготовки запчастин до відвантаження.

Коли від Постачальника надходять нові запчастини, Складський працівник приймає їх, перевіряє якість і цілісність, а потім оновлює дані в системі. Якщо виявляються пошкодження чи дефектні деталі, їх списують або повертають Постачальнику. Адміністратор може бути залучений до процесу, якщо виникає потреба в оновленні системних параметрів, зміні прав доступу чи внесенні змін до довідників. Він також може ініціювати запити на повернення коштів у разі неможливості виконання замовлення через брак чи пошкодження товару. Після успішної перевірки та приймання запчастин Система повідомляє про можливість доставки і ініціює процес відвантаження замовлення Клієнту. Складський працівник готує запчастини, оформлює супровідні документи і передає їх на відправку. Система фіксує всі зміни в базі даних, оновлюючи інформацію про складські залишки та статус замовлення.

Висновки. Використання уніфікованої мови моделювання (UML) у розробці інформаційних систем управління складським обліком автозапчастин є ефективним підходом, який сприяє підвищенню якості аналізу, проєктування та впровадження таких систем. Використання UML-діаграм дозволяє формалізувати вимоги, чітко моделювати бізнес-процеси та взаємодію між елементами системи, що мінімізує ризики помилок, оптимізує витрати та підвищує ефективність управлінських рішень. Практична реалізація підтвердила, що розроблена система здатна автоматизувати ключові процеси, інтегруватися з сучасними ERP-рішеннями та масштабуватися відповідно до змін ринку. Перспективними напрямками подальших досліджень є глибший аналіз специфічних бізнес-процесів управління складським обліком, розробка детальніших моделей взаємодії між компонентами системи та використання новітніх цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту для аналізу даних і прогнозування попиту. Важливим аспектом є інтеграція інформаційних систем із існуючими ERP-платформами для покращення автоматизації процесів, скорочення витрат і підвищення швидкості прийняття рішень. Також доцільно розглянути можливості застосування технологій Інтернету речей (IoT) та BigData для вдосконалення збору й аналізу даних про складські запаси, що забезпечить більш точний моніторинг та оперативне реагування на зміни ринкових умов. Окрему увагу слід приділити безпеці даних, використовуючи сучасні методи захисту, такі як шифрування, багаторівнева автентифікація та резервне копіювання, що гарантуватиме стабільну та безпечну роботу системи. Крім того, польові дослідження та кейс-стаді допоможуть оцінити ефективність впроваджених рішень у реальних умовах і визначити можливості для подальшого вдосконалення технологій. Таким чином, проведене дослідження робить вагомий внесок у розвиток інформаційних систем управління запасами автозапчастин, надаючи як теоретичні основи, так і практичні рекомендації для впровадження інновацій у сфері складської логістики.

Список бібліографічного опису

1. WMS Система управління складом. Управління складським господарством: веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення: 15.03.2025).
2. Відображаємо результати інвентаризації: інвентаризаційні різниці (нестачі, надлишки): веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення: 17.03.2025).
3. Автоматизація та оптимізація складу: веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення: 20.03.2025).
4. Ключові проблеми у сфері транспорту та логістики під час війни в Україні: веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення: 21.03.2025).
5. Логістика України під час війни: виклики та перспективи: веб-сайт. URL: [illegible] (дата звернення: 25.03.2025).
6. Dalfi L., Pradjoko, Aaril A.S. Application of Agile Development Methods in the Development of Integrated Systems for Vehicle Body Repair. IAIC International Conference Series. Indonesia, 2023. 70 – 78.
7. Fauzan R., Shiddiq M. F., Rukhiya N. R. The Designing of Ware house Management Information System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. United Kingdom, 2020. Vol 879 No 1.
8. Jaelani G. Warehouse accounting information information system design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. UnitedKingdom 2020. 050027-1 - 050027-6.
9. Semchuk, L., & Proskura, Y. UML diagrams of the management system of maintenance stations. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I OchronieŚrodowiska, 14(4), 2024. 141-145.

References

1. WMS Warehouse Management System, Warehouse Management; website: URL: [illegible] (date: 15.03.2025).
2. Displaying inventory results: inventory differences (shortages, surpluses): website: URL: [illegible] (date: 17.03.2025).
3. Warehouse Automation and Optimization: website: URL: [illegible] (date 20.03.2025)
4. Key problems in the field of transport and logistics during the war in Ukraine: website: URL: [illegible] (date 21.03.2025)
5. Logistics of Ukraine during the war: challenges and prospects: website: URL: [illegible] (date 25.03.2025).
6. Diddi I., Pradipto, Aziz A. S. Application of Agile Development Methods in the Development of Integrated Systems for Vehicle Body Repair. IAIC International Conference Series. Indonesia, 2023. 70 - 78.
7. Fauzan R., Shiddiq M. F., Raditya N. R. The Designing of Warehouse Management Information System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. United Kingdom, 2020. Vol 879 No 1.
8. Irfan G. Warehouse accounting automation information system design. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. United Kingdom 2020. 060027-1 - 060027-6.
9. Samchuk, L., & Povstiana, Y. UML diagrams of the management system of maintenance stations. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I OchronieŚrodowiska, 14(4), 2024, 141-145.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-28
УДК: 004.9:528.9
Сверстюк Андрій Степанович[1], д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0001-8644-0776
Гузоватий Сергій Володимирович[2], магістр
[1] Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, м. Тернопіль, Україна
[2] Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КАРТОГРАФІЧНИХ СЕРВІСІВ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ ІНТЕРАКТИВНИХ КАРТ ПРИ ВЕБРОЗРОБЦІ

Сверстюк А. С., Гузоватий С. В. Порівняльний аналіз картографічних сервісів для інтеграції інтерактивних карт при веброзробці. У статті досліджено ключові картографічні сервіси для інтеграції інтерактивних карт при веброзробці, зокрема Google Maps, Mapbox та рішення на базі OpenStreetMap. Актуальність роботи зумовлена необхідністю оптимального рішення для візуалізації просторових даних, оскільки невдалий вибір може призвести до зростання витрат, обмеження функціоналу та ускладнень у розробці. Встановлено, що основною проблемою для веброзробників є вибір між продуктами, які надають велику кількість різноманітних функцій або більш гнучкими рішеннями, які мають нижчу початкову вартість, але потребують додаткових навичок для реалізації. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу Google Maps, Mapbox та OpenStreetMap. У статті використано методи порівняльного аналізу функціональних можливостей, моделей ціноутворення, ліцензійних умов та легкості інтеграції. Процес інтеграції кожного сервісу продемонстровано на практичних прикладах коду з візуалізацією кінцевого результату. Результати показали, що Google Maps та Mapbox пропонують готові рішення з широким функціоналом, тоді як рішення на базі OpenStreetMap надають максимальну гнучкість, є безкоштовними, але вимагають інтеграції інших платних сторонніх інструментів. Зроблено висновок, що вибір оптимального сервісу не є однозначним і залежить від пріоритетів проекту: Google Maps підходить, коли потрібно великий спектр інтегрованих функцій, Mapbox – для завдань із високими вимогами до кастомізації, а OpenStreetMap – для проектів з обмеженим бюджетом та потребою в гнучкості.
Ключові слова: картографічний сервіс, інтерактивна карта, веброзробка, інтеграція, Google Maps, Mapbox, OpenStreetMap, функціонал, ціноутворення

Sverstiuk A., Huzovatyi S. Comparative analysis of mapping services for integrating interactive maps in web development. This article explores key mapping services for integrating interactive maps in web development, focusing on Google Maps, Mapbox, and solutions based on OpenStreetMap. The relevance of the study stems from the need to select an optimal tool for spatial data visualization, as a poor choice can lead to increased costs, limited functionality, and development complications. It was found that the main challenge for developers lies in choosing between feature-rich commercial platforms and more flexible, lower-cost solutions that require additional technical skills to implement. The aim of the research is to conduct a comparative analysis of Google Maps, Mapbox, and OpenStreetMap. The study employs methods of comparative evaluation based on functionality, pricing models, licensing conditions, and ease of integration. The integration process of each service is demonstrated through practical code examples with visualized outputs. The results show that Google Maps and Mapbox offer out-of-the-box solutions with broad functionality, while OpenStreetMap provides maximum flexibility and is free of charge, though often reliant on the integration of third-party tools, some of which may be paid. The conclusion emphasizes that there is no universal solution: the optimal choice depends on project priorities. Google Maps is suitable for applications requiring a wide range of integrated features, Mapbox is best for projects with high customization needs, and OpenStreetMap is ideal for low-budget solutions demanding flexibility.
Keywords: mapping service, interactive map, web development, integration, Google Maps, Mapbox, OpenStreetMap, functionality, pricing.

Постановка проблеми. Інтеграція інтерактивної карти може стати невід'ємною частиною проєкту, виступаючи потужним інструментом для візуалізації просторових даних, надання навігаційних функцій, відображення локацій бізнесу, реалізації логістичних рішень тощо. У веброзробці карти можна зустріти всюди, навіть на найпростіших сайтах часто реалізується HTML-елемент з місцезнаходженням компанії.

Якщо для створення сайту потрібне щось складніше, ніж місцезнаходження за допомогою точки на мапі, то така реалізація інтерактивної карти вимагає вибору та інтеграції відповідного картографічного сервісу. Основну нішу на ринку ПЗ для картографування займає Google Maps 82,3%, ще можна виділити Mapbox 4,65% та OpenStreetMap (OSM) 1,05% [1]. Також є Leaflet зі своїми 5,96%, це бібліотека, за допомогою якої можна розширити функціонал OSM. Незважаючи на явне лідерство Google Maps, сфера картографічних сервісів пропонує різноманіття рішень, які мають свої особливості, це стосується ціноутворення, гнучкості, функціоналу, складність інтеграції та підтримки, а також ліцензійні умови.

Невдалий вибір картографічного сервісу може призвести до збільшення витрат, ускладнення подальшої розробки та підтримки проєкту, обмеження функціоналу або погіршення

користувацького досвіду. Таким чином, перед компаніями, веб-розробниками постає проблема вибору оптимального рішення, що відповідало б технічним вимогам, бюджету та забезпечувало б найкращий користувацький досвід.

Аналіз досліджень. Досліджень у сфері картографічних сервісів існує багато та вони переважно висвітлюють окремі аспекти використання та порівняння. Значна частина робіт зосереджується на зручності використання та користувацькому досвіді. У статті [2] проводиться детальний аналіз дизайну, масштабу та зручності використання різних ПЗ для картографування, порівнюється візуалізація графічних елементів та загальна інтуїтивність інтерфейсу. Напрям на користувацькому досвіді простежується у дослідженні [3] та роботі [4], яка присвячена ефективності картографічних сервісів в контексті графічного інтерфейсу користувача на різних пристроях. Ці дослідження є важливими для розуміння вимог до фінального вигляду та функціональності інтерактивної карти для користувача, проте вони, як правило, не заглиблюються у технічні та комерційні аспекти вибору та інтеграції сервісів, які використовуються розробниками для створення цих інтерфейсів.

Окремим напрямком досліджень є аналіз технічної продуктивності картографічних інструментів. Праці в цій категорії можуть порівнювати швидкість завантаження, рендерингу та взаємодії з картами при роботі з різними типами даних або на різних пристроях. Наприклад, дослідження [5] проводило оцінку продуктивності популярних бібліотек Leaflet, OpenLayers та Mapbox GL JS при відображенні геоданих. Результати таких робіт надають об'єктивні дані про технічні можливості картографічних інструментів, що є цінним критерієм для розробників.

Крім того, існують багато робіт, де картографічні сервіси використовуються як інструмент для досліджень або реалізації рішень у специфічних предметних областях, але порівняльний аналіз самих сервісів не є основним фокусом таких праць [6].

Незважаючи на наявність цінних досліджень, що висвітлюють окремі аспекти картографічних сервісів, існуючі роботи часто не надають детального аналізу та порівняння за такими ключовими параметрами, як модель ціноутворення та реальна вартість використання для різних масштабів проектів, вимоги ліцензування для комерційного використання, повнота та гнучкість API для типових та розширених функцій, легкість інтеграції. Значна частина досліджень фокусується на кінцевому продукті або вузьких технічних аспектах.

Метою роботи є проведення порівняльного аналізу ключових картографічних рішень для інтеграції інтерактивних карт при веброзробці, зокрема Google Maps, Mapbox та OpenStreetMap. Основними критеріями є функціонал, модель ціноутворення, ліцензування та легкість інтеграції.

Виклад основного матеріалу дослідження. Першим критерієм для порівняння є функціонал, що надають картографічні сервіси для типових завдань веброзробки. Google Maps надає широкий спектр функцій, інтегрованих у свою платформу через різні API. До них належать відображення базових карт з різними стилями, розширена робота з геометричними об'єктами (маркери, лінії, полігони), геокодування, побудова маршрутів та розрахунок відстаней, інструменти для стилізації карти.

Mapbox також пропонує багатий вибір вбудованих функцій, сильні сторони якого включають гнучку кастомну стилізацію карт, ефективну роботу з векторними мапами, інструменти для візуалізації даних, а також API для геокодування та побудови маршрутів.

Розглядаючи функціонал OpenStreetMap, важливо зазначити, що це є некомерційний проєкт та джерело географічних даних. Для відображення цих даних та базової взаємодії часто використовується JavaScript-бібліотеки Leaflet або OpenLayers. Більшість розширених функцій таких як геокодування, побудова маршрутів тощо, реалізуються за допомогою сторонніх бібліотек або сервісів. Таким чином, такий підхід надає велику гнучкість у виборі, але вимагає додаткових навичок від розробника.

Наступним ключовим критерієм для порівняння є модель ціноутворення та потенційна вартість використання картографічного сервісу. Google Maps працює за моделлю pay-as-you-go, де вартість залежить від кількості запитів до API, при цьому надається щомісячний безкоштовний кредит у розмірі $200, який можна використовувати для оплати більшості їхнього API. Після перевищення щомісячного кредиту, їх послуги стають платними, вартість обраховується за кожні 1000 запитів та тип API (Dynamic Maps, Static Maps, Map Tiles API, Routes API). При зростанні кількості користувачів та інтенсивності використання платних API, вартість може суттєво зростати, що вимагає ретельного моніторингу.

Mapbox пропонує подібну модель ціноутворення, яка може базуватися на завантаження карти, кількості запитів API, або активних користувачах в місяць. Безкоштовні послуги надаються для кожного типу використання окремо (1000 активних користувачів, 50000 завантажень карти, 100000 API для побудови маршрутів). Вартість платних послуг також обраховується за кожних 1000 запитів. Mapbox часто сприймають як більш передбачуваний та потенційно дешевший за Google Maps для певних сценаріїв використання та великих обсягів.

Рішення на базі OpenStreetMap мають принципово іншу модель. Самі геодані є відкритими та безкоштовними, а для базового відображення та взаємодії використовуються бібліотеки, які теж є безкоштовними. Витрати виникають при необхідності використання розширених функцій. Наприклад для отримання можливостей геокодування та побудови маршрутів на комерційному рівні, необхідно залучати сторонні, часто платні, сервіси.

Наступним критерієм є ліцензування, яке визначає юридичні умови використання сервісів, особливо у комерційних проєктах. Google Maps має комерційні умови використання, які вимагають відображення карти через їхні API і можуть містити обмеження на зберігання даних або використання певних функцій без ліцензії Enterprice (корпоративний план).

Mapbox також має комерційну ліцензію, умови якої залежать від конкретного продукту та плану використання, але є гнучкішим у плані кастомізації та використання власних даних. Для обох комерційних сервісів зазвичай вимагається зазначення атрибуції.

OpenStreetMap має відкриту ліцензію, яка дозволяє вільно копіювати, поширювати та адаптувати дані, але вимагає обов'язкового зазначення атрибуції. Якщо брати бібліотеку Leaflet, то вона не накладає суворих обмежень, крім збереження інформації про авторські права.

Легкість інтеграції буде порівнюватись на простому відображенні карти та створенню маркера на мапі. Щоб розробнику додати на сайт Google Maps потрібно:

– створити проєкту Google Cloud Console;

– прив'язати до акаунту платіжний засіб;

підключити до проєкту Google Maps JavaScript API та отримати ключ;

– підключити бібліотеки для відображення мапи та створення маркерів на веб-сторінку, це робиться через HTML-тег «script» в якому обов'язково потрібно вказати раніше отриманий API ключ;

ініціалізувати мапу та створити маркер, вказавши потрібні координати. Код реалізації Google Maps продемонстровано в лістингу 1 та його результат зображено на рисунку 1.

Лістинг 1 – Код реалізації Google Maps

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>Googlemaps</title>
    <script
        src="https://maps.googleapis.com/maps/api/js?key=API_KEY&loading=async
&libraries=maps&v=beta&libraries=marker"
        defer>
        </script>
</head>
<body>
    <gmp-map center="51.269403292411464, 25.540115627597536" zoom="12"
map_id="8035b9826bcb45afb2899d4c"
        style="height: 400px">
        <gmp-advanced-marker position="51.2670980549945, 25.541119114127926"
            title="Manevichi"></gmp-advanced-marker></gmp-map>
</body>
</html>
```

кінець лістингу 1

Рис. 1. Результат коду Google Maps

Щоб розробнику додати на сайт Mapbox потрібно:

– створити акаунт на їхньому сайті, де потрібно теж прив'язати платіжний засіб;
– скопіювати Access Token;
– підключити CSS та JavaScript бібліотеку Mapbox GL JS на веб-сторінку через теги «link» та «script»;
– ініціалізувати мапу та створити маркер, вказавши Access Token та потрібні координати.

Код реалізації Mapbox продемонстровано в лістингу 2 та його результат зображено на рисунку 2.

Лістинг 2 – Код реалізації Mapbox

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
    <meta charset="utf-8">
    <title>Mapbox</title>
    <meta name="viewport" content="initial-scale=1,maximum-scale=1,
user-scalable=no">
    <link href="https://api.mapbox.com/mapbox-gl-js/v1.12.0/mapbox-gl.css"
rel="stylesheet">
    <script src="https://api.mapbox.com/mapbox-gl-js/v1.12.0/mapbox-gl.js">
</script>
    <style> #map { height: 400px; } </style>
</head>
<body>
    <div id="map"></div>
    <script>
        mapboxgl.accessToken = 'Access_Token';
        const map = new mapboxgl.Map({
            container: 'map',
            style: 'mapbox://styles/mapbox/streets-v12',
            center: [illegible],
            zoom: 12
        });
        const marker1 = new mapboxgl.Marker()
            .setLngLat([illegible])
            .addTo(map);
    </script>
</body>
</html>
```

кінець лістингу 2

Рис. 2. Результат коду Mapbox

Рішення на базі OpenStreetMap дещо відрізняється, не потрібно створювати акаунт та використовувати ключі. Для реалізації залучено бібліотеку Leaflet, яка є безкоштовною. Тому розробнику потрібно здійснити наступні кроки:

– підключити CSS та JavaScript бібліотеку Leaflet на веб-сторінку через теги «link» та «script»;

– ініціалізувати мапу та добавити шар тайлів, щоб відобразити карту від OSM, і після цього створити маркер. Код реалізації Leaflet (OSM) продемонстровано в лістингу 3 та його результат зображено на рисунку 3.

Лістинг 3 – Код реалізації Leaflet (OSM)

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>OpenStreetMap</title>
    <link rel="stylesheet"
    href="https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.css"
    integrity="sha256-p4NxAoJBhIIN+hmNHrzRCf9tD/miZyoHS5obTRR9BMY="
    crossorigin="" />
    <script src="https://unpkg.com/leaflet@1.9.4/dist/leaflet.js"
    integrity="sha256-20nQCchB9co0qIjJZRGuk2/Z9VM+kNiyxNV1lvTlZBo="
    crossorigin=""></script>
    <style> #map { height: 400px;} </style>
</head>
<body>
    <div id="map"></div>
    <script>
        var map = L.map('map')
        .setView([51.28840329241454, 25.540215627537538], 13);
        L.tileLayer('https://tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png', {
            maxZoom: 19,
            attribution: '&copy;
      <a href="http://www.openstreetmap.org/copyright">OpenStreetMap</a>'
        }).addTo(map);
        var marker =
      L.marker([51.28704805499956, 25.54112937412793]).addTo(map);
    </script>
</body>
</html>
```

кінець лістингу 3

Рис. 3. Результат коду Leaflet (OSM)

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній статті проведено порівняльний аналіз ключових картографічних рішень інтерактивних карт при веброзробці: Google Maps, Mapbox та OpenStreetMap за критеріями функціоналу, моделі ціноутворення, ліцензування та легкості інтеграції.

Виявлено, що Google Maps та Mapbox пропонують рішення з широким спектром вбудованих функцій через свої платформи та API, покриваючи більшість типових потреб веброзробки. Тоді як OpenStreetMap потребує сторонніх інструментів навіть для відображення та базової взаємодії.

Порівняння моделей ціноутворення виявило, що Google Maps та Mapbox працюють за принципом pay-as-you-go з різними безкоштовними рівнями та тарифікацією за використання конкретних API або послуг. Витрати при використанні цих рішень масштабуються із зростанням навантаження. OpenStreetMap є безкоштовним, але вимагає врахування витрат за використання платних сторонніх сервісів, які надають розширений функціонал.

Google Maps та Mapbox використовують комерційну ліцензію з необхідністю дотримання умов використання та зазначення атрибуції. Дані OpenStreetMap поширюються під відкритою ліцензією з обов'язковою атрибуцією, що стає привабливим вибором для проєктів з відкритим кодом.

Легкість інтеграції продемонстровано для 3 картографічних сервісів, показано з прикладами коду та його результатом. Оцінка показала, що Leaflet (OSM) вирізняється найнижчим порогом входу, тоді як Google Maps та Mapbox вимагають більше початкових кроків.

Загалом, вибір оптимального картографічного рішення для веброзробки не має однозначної відповіді і залежить від пріоритетів та специфічних потреб конкретного проєкту. Google Maps може бути кращим для проєктів, що потребують широкого спектру інтегрованих функцій та мають бюджет, готовий до масштабування за запитами. Mapbox підходить для проєктів з високими вимогами до кастомізації, роботи з векторними даними та може бути вигіднішим на великих обсягах. Рішення на базі OpenStreetMap є оптимальними для проєктів з обмеженим бюджетом, високими вимогами до гнучкості та готовністю інтегрувати різні компоненти для отримання необхідного функціоналу.

Подальші дослідження можуть розширювати цю тему, це стосується детального порівняння реалізацій та продуктивності конкретних функціональних можливостей картографічних сервісів, так як у даній роботі було надано лише огляд функціоналу. Також можна проводити аналіз менш відомих рішень для вебкартографії.

Список бібліографічного опису:

1. Mapping and GIS Market Share Report | Competitor Analysis | Google Maps API, Google Maps API (free), Leaflet. URL: [illegible] (дата звернення: 29.04.2025).
2. Zajíček J., Voženílek V. Exploring Cartographic Differences in Web Map Applications: Evaluating Design, Scale, and Usability. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Т. 14, № 1. С. 9.
3. Cybulski P., Horbiński T. User Experience in Using Graphical User Interfaces of Web Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 7. P. 412.
4. Horbiński T., Cybulski P., Medyńska-Gulij B. Web Map Effectiveness in the Responsive Context of the Graphical User Interface. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 134.

5. Evaluating the Performance of Three Popular Web Mapping Libraries: A Case Study Using Argentina's Life Quality Index / A. Zapata et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 10. P. 563.
6. Cohen A., Dalyot S. Route planning for blind pedestrians using OpenStreetMap. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2020. P. 2399808320935981.

References:

1. Mapping and GIS Market Share Report | Composition Analysis | Google Maps API, Google Maps API (free), Leaflet. URL: https://enlyft.com/tech/ (accessed: 29.04.2025).
2. Zeyfli J., Morenfeld V. Exploring Cartographic Differences in Web Map Applications: Evaluating Design, Scale, and Usability. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. Т. 14, № 1. С. 9.
3. Cybulski P., Horbiński T. User Experience in Using Graphical User Interfaces of Web Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 7. P. 412.
4. Horbiński T., Cybulski P., Medyńska-Gulij B. Web Map Effectiveness in the Responsive Context of the Graphical User Interface. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 134.
5. Evaluating the Performance of Three Popular Web Mapping Libraries: A Case Study Using Argentina's Life Quality Index / A. Zapata et al. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, no. 10. P. 563.
6. Cohen A., Dalyot S. Route planning for blind pedestrians using OpenStreetMap. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2020. P. 2399808320935981.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-29
УДК 004.94:57.087.1:616.12-073.7
Сверстюк Андрій Степанович[2], д.т.н., професор
https://orcid.org/0000-0001-8664-077b
Мосій Любомир Євгенійович[1], аспірант
https://orcid.org/0009-0008-9778-331X
[1] Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна
[2] Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, м. Тернопіль, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АМПЛІТУДНОЇ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛІВ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АНАЛІЗУ ЇХ МОРФОЛОГІЧНИХ ТА РИТМІЧНИХ ОЗНАК

Сверстюк А. С., Мосій Л. Є. Математичне моделювання амплітудної варіабельності електрокардіосигналів для інформаційної технології аналізу їх морфологічних та ритмічних ознак. У статті представлено математичне моделювання амплітудної варіабельності електрокардіосигналів (ЕКС) як важливого компонента інформаційної технології аналізу морфологічних і ритмічних ознак серцевих циклів. Розроблено математичну модель функції амплітудної варіабельності $V_i(m)$, що дозволяє кількісно оцінювати зміни амплітудних характеристик зубців ЕКС (P, Q, R, S, T) між послідовними кардіоциклами. Запропоновано комплексний метод обробки амплітудної варіабельності, що включає розрахунок середнього значення, стандартного відхилення, коефіцієнта варіації, розмаху значень та індексу амплітудної стабільності. Проведено порівняльний аналіз показників амплітудної варіабельності у здорових пацієнтів та пацієнтів з кардіопатологією, який виявив суттєві відмінності в розмаху амплітудної варіабельності (в середньому від 12 до 40 разів вище при патології). Підтверджено нормальність розподілу показників функції амплітудної варіабельності, що забезпечує надійність параметричних методів аналізу в рамках інформаційної технології. Запропоновано архітектуру інформаційної технології з модулем розрахунку показників амплітудної варіабельності, що дозволяє виявляти приховані патерни та аномалії, а також створює передумови для розробки прогностичних алгоритмів діагностики серцево-судинних патологій на основі динаміки амплітудної варіабельності ЕКС.

Ключові слова: електрокардіосигнал, амплітудна варіабельність, метод, модель, математичне моделювання, аналіз, інформаційна технологія, алгоритм, кардіодіагностика, хвилі ЕКС, штучний інтелект, класифікація, штучний інтелект, системи машинного навчання, ритм серця.

Sverstiuk A., Mosiy L. Mathematical modeling of electrocardiogram signal amplitude variability for information technology analysis of their morphological and rhythmic characteristics. *The article presents mathematical modeling of amplitude variability of electrocardiographic signals (ECS) as an essential component of information technology for analyzing morphological and rhythmic features of cardiac signals. A mathematical model of the amplitude variability function $V_i(m)$ has been developed, enabling quantitative evaluation of amplitude changes in characteristic ECS waves (P, Q, R, S, T) between consecutive cardiac cycles. A comprehensive method for processing amplitude variability has been proposed, including the calculation of mean value, standard deviation, coefficient of variation, range of values, and amplitude stability index. A comparative analysis of amplitude variability indicators in healthy patients and patients with cardiopathology revealed significant differences in the range of amplitude variability (on average 12 to 40 times higher in pathological cases). The normal distribution of amplitude variability function indicators has been confirmed, ensuring the reliability of parametric analysis methods within the information technology framework. The architecture of information technology with a module for calculating amplitude variability indicators has been proposed, enabling the detection of hidden patterns and anomalies, as well as creating prerequisites for developing predictive algorithms for diagnosing cardiovascular pathologies based on the dynamics of ECS amplitude variability.*

Keywords: electrocardiographic signal, amplitude variability, method, model, mathematical modeling, analysis, information technology, algorithm, cardiac diagnostics, ECS waves, artificial intelligence, classification, machine learning, heart rhythm.

Постановка проблеми. Сучасна кардіодіагностика потребує інтелектуальних інформаційних технологій, побудованих на основі адекватних математичних моделей та методів обробки електрокардіосигналів (ЕКС), які давали б змогу виявляти та диференціювати патологічні стани серцево-судинної системи (ССС). Існуючі інформаційні технології аналізу ЕКС переважно зосереджуються на часових характеристиках або повній морфології сигналу, проте недостатньо уваги приділяється систематичному аналізу динаміки амплітудних значень характеристичних зубців, які містять критично важливу діагностичну інформацію. Зміна амплітуди зубців P, Q, R, S і T ЕКС відображає електрофізіологічні процеси в серці та може слугувати ранніми індикаторами патологічних змін, однак для ефективного використання цих даних необхідна розробка спеціалізованих інформаційних технологій, що включатимуть відповідні математичні моделі та методи обробки. Існуючі автоматизовані системи кардіомоніторингу не містять функціональних модулів для дослідження варіабельності амплітудних значень характеристичних зубців ЕКС від кардіоциклу до кардіоциклу, хоча як покажуть наші дослідження, містить додаткові

діагностичні ознаки серцево-судинних патологій (ССП). Розробка інформаційної технології для аналізу як морфологічних, так і ритмічних ознак кардіосигналів з урахуванням амплітудної варіабельності, є актуальним завданням сучасної діагностики ССС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ЕКС, що відображають електричну активність серця, демонструють амплітудну варіабельність, яка містить значущу клінічну інформацію та відображає динамічні фізіологічні процеси, що регулюють серцеву діяльність [1]. Математичне моделювання цієї амплітудної варіабельності забезпечує потужний інструментарій для розуміння базових процесів, що уможливлює вдосконалення діагностичних можливостей та розробку персоналізованих стратегій лікування [2]. На варіації, що спостерігаються в амплітуді ЕКС, таких як зубець P, комплекс QRS і зубець T, впливає багато чинників, включаючи анатомічну структуру серця, провідні шляхи, модуляцію вегетативної нервової системи та різноманітні патофізіологічні стани [3]. Застосовуючи математичні моделі, ми можемо проаналізувати вплив кожного з цих чинників, глибше зрозуміти їхню взаємодію та вплив на ЕКС [4]. Крім того, аналіз ЕКС із використанням параметрів, отриманих з адекватних математичних моделей надає достовірні діагностичні ознаки навіть за наявності аномалій чи низької якості сигналу, усуваючи потребу в значній попередній обробці та демонструючи незалежність від варіацій масштабу та частоти [5].

Для точного відтворення амплітудної варіабельності ЕКС можна застосовувати різні методи математичного моделювання, включаючи статистичні методи, частотно-часовий аналіз та нелінійну динаміку. Статистичні моделі можуть використовуватися для характеристики ймовірнісних розподілів амплітуд ЕКС та їхніх часових варіацій, надаючи уявлення про базові статистичні властивості сигналу. Частотно-часовий аналіз, такий як вейвлет-перетворення, уможливлює декомпозицію сигналу ЕКГ на його складові частотні компоненти, виявляючи, як амплітуда кожного компонента змінюється з часом. Підходи нелінійної динаміки, що ґрунтуються на теорії складних систем, стають особливо актуальними, враховуючи природну нелінійність та нестаціонарність фізіологічних сигналів [6]. Математичні моделі можуть включати фізіологічні параметри, такі як варіабельність серцевого ритму, для відображення впливу вегетативної нервової системи на амплітуду ЕКС [7].

У статті [8] запропонована методика комп'ютерного моделювання ЕКС на основі циклічних випадкових процесів із застосуванням статистичних оцінок та дискретних функцій ритму. У роботі [9] запропоновано ритмо-адаптивні розклади в ряди Фур'є для циклічних числових функцій та імовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів, які демонструють кращу ефективність порівняно з традиційними методами Фур'є. Розроблено ритмо-адаптивні методи статистичного оцінювання циклічних випадкових процесів [10], обґрунтувавши їх незміщеність та узгодженість, а також показано їх вищу ефективність порівняно з не ритмо-адаптивними підходами, особливо при обробці сигналів ЕКГ. У роботі [11] розроблено адаптивний метод оцінювання дискретних ритмічних структур циклічних сигналів з використанням різноманітних методів інтерполяції, що підвищує точність обробки таких сигналів. Ці інновації сприяють точнішому моделюванню та аналізу циклічних стохастичних сигналів з нерегулярним ритмом у різних сферах практичного застосування.

У сучасних наукових дослідженнях представлений різноманітний спектр методологічних підходів до математичного моделювання ЕКС. Зокрема, варто відзначити використання алгоритмів на основі дерев прийняття рішень, що застосовуються для прогностичного оцінювання розвитку кардіологічних патологій [12]. Суттєвий внесок у методологію аналізу кардіосигналів зроблено через формалізацію та експериментальну перевірку математичної моделі синхронно зареєстрованих кардіосигналів із застосуванням апарату векторів циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів [13]. Комплексний підхід до теоретичного обґрунтування й практичної реалізації методів опрацювання сигналів серцевої діяльності запропоновано на основі математичного апарату циклічних випадкових процесів та їх векторних узагальнень [14]. Особливу увагу дослідників привертають методики імітаційного моделювання синхронних кардіосигналів із використанням векторного представлення циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, що має безпосереднє застосування у розв'язанні прикладних задач кардіодіагностики [15].

Вартим уваги є дослідження [16], де представлено модель на основі циклічного дискретного випадкового процесу з інтегрованою функцією часового ритму, що враховує амплітудні характеристики характеристичних зубців ЕКС (P, Q, R, S, T). Запропонована модель дає змогу адекватно відтворити фундаментальну циклічну природу ЕКС із одночасним урахуванням їх стохастичної варіативності та флуктуацій амплітудних параметрів кардіоциклів.

Розробка математичних моделей для амплітудної варіабельності ЕКС вимагає ретельного врахування кількох чинників, включаючи вибір структури моделі, підбір відповідних параметрів та перевірку моделі на експериментальних даних. Структуру моделі слід обирати так, щоб вона відображала базові фізіологічні процеси, що генерують ЕКС, балансуючи між складністю моделі та її інтерпретованістю. Вибір параметрів передбачає визначення ключових параметрів, що регулюють поведінку моделі, та оцінку їхніх значень з експериментальних даних [17]. Параметри можна оптимізувати за допомогою різних алгоритмів оптимізації, таких як градієнтний спуск або генетичні алгоритми, для досягнення найкращої відповідності між прогнозами моделі та спостережуваними даними. Важливо враховувати, що розбіжності у попередній обробці ЕКС можуть виникати через специфічне програмне забезпечення різних виробників, що потенційно вимагає перенавчання моделі під час використання різних інструментів обробки сигналів, а глибокі нейронні мережі, хоча й здатні аналізувати досліджувані сигнали, часто потребують великих навчальних вибірок і не обов'язково значно перевершують традиційне машинне навчання на основі інженерії ознак для традиційної діагностики ЕКС [18].

Корисність математичних моделей в аналізі ЕКС поширюється на різноманітні клінічні застосування, включаючи виявлення аритмій, моніторинг ішемії та діагностику серцевої недостатності. Математичні моделі можуть використовуватися для розробки алгоритмів, що автоматично виявляють аномальні характеристичні ознаки ЕКС, пов'язані з аритміями, уможливлюючи раннє виявлення та своєчасне втручання. Уявлення, отримані з математичного моделювання, можуть використовуватися для розробки нових діагностичних інструментів та терапевтичних втручань, потенційно покращуючи результати лікування пацієнтів та зменшуючи тягар серцево-судинних захворювань [19]. Характеризуючи зміни в амплітудній варіабельності ЕКС, пов'язані з ішемією, математичні моделі можуть допомагати в ранній діагностиці та лікуванні цього стану. Крім того, в контексті серцевої недостатності математичні моделі можуть використовуватися для оцінки важкості стану та прогнозування реакції пацієнта на лікування [20].

Незважаючи на значні досягнення в математичному моделюванні амплітудної варіабельності ЕКС, залишаються певні проблеми. Однією з основних проблем є висока розмірність та складність досліджуваних сигналів, що може ускладнювати розробку точних та ефективних обчислювальних моделей. Іншою проблемою є варіабельність ритму та амплітуди ЕКС в різних пацієнтів, яка може обмежувати узагальнюваність моделей, навчених на даних певної популяції. Також важливо враховувати обмежену кількість відведень у сучасних носимих пристроях, які можуть бути менш точними у вимірюванні стану серця порівняно зі стандартними 12-канальними ЕКГ [21]. Майбутні дослідження мають зосередитися на розробці більш досконалих моделей, здатних відтворити повну складність сигналів ЕКГ, а також на розробці методів персоналізації моделей для окремих пацієнтів. Крім того, вирішення проблеми незбалансованості даних, коли певні характеристичні ознаки аритмій є рідкісними, є критичним для вдосконалення ефективності класифікаторів [22]. Подолання цих проблем прокладе шлях для розробки ефективніших та надійніших діагностичних і терапевтичних інструментів для серцево-судинних захворювань (ССЗ) [23]. Електрокардіографічна візуалізація являє собою значний прогрес порівняно зі стандартними процедурами в сучасній кардіології як неінвазивний метод оцінки ССЗ та аритмій [24]. Отже, математичне моделювання пропонує потужний інструмент для аналізу амплітудної варіабельності ЕКС, надаючи цінні відомості про базові фізіологічні процеси та уможливлюючи розробку нових діагностичних і терапевтичних стратегій [25]. З розвитком технологій інтеграція моніторингу ЕКГ з експертизою людини залишається важливою [26].

Традиційні статистичні методи, що наразі застосовуються в оцінці ризику ССЗ, часто надмірно спрощують складні взаємозв'язки, включаючи лише обмежену кількість прогностичних показників [27]. Досягнення в галузі машинного навчання уможливили використання більших наборів ознак, що призвело до підвищення точності прогнозування серцево-судинних подій. Методології глибокого навчання, особливо ті, що використовують згорткові нейронні мережі, продемонстрували перспективні результати в аналізі сигналів ЕКГ для виявлення аритмій [28–30]. Ці алгоритми застосовувалися для класифікації кардіоциклів електрокардіограми, вирішуючи проблему хибних тривог на стадії сегментації [31]. Штучний інтелект, застосований до інтерпретації ЕКС, становить перспективний підхід для раннього виявлення [32–34]. Крім того, застосування штучного інтелекту та машинного навчання в управлінні ССЗ відкриває нові можливості для покращення результатів лікування пацієнтів та розвитку медичних досліджень [35].

Мета дослідження. Мета дослідження полягає у розробці математичної моделі амплітудної варіабельності ЕКС та відповідних методів її статистичної обробки для створення інформаційної технології комплексного аналізу морфологічних та ритмічних ознак кардіосигналів. Дослідження спрямоване на формалізацію кількісного підходу до оцінки міжциклових змін амплітуд характеристичних зубців ЕКС (P, Q, R, S, T), виявлення діагностично значущих показників амплітудної варіабельності, а також верифікацію запропонованої моделі на прикладі порівняльного аналізу ЕКС умовно здорових пацієнтів та пацієнтів з екстрасистолією. Кінцевою метою є інтеграція розробленої моделі та методів в архітектуру інформаційної технології аналізу кардіосигналів для розширення її діагностичних можливостей та створення передумов для розробки ефективних алгоритмів виявлення ССЗ.

Виклад основного матеріалу. Дослідження варіабельності показників амплітуди зубців ЕКС у кожному серцевому кардіоциклі дає змогу виявити приховані патологічні стани при функціонуванні ССС. Застосування методів математичного моделювання дає змогу розробити ефективні методи дослідження амплітудної варіабельності ЕКС на основі її математичної моделі для виявлення додаткових діагностичних ознак ССЗ.

Для моделювання амплітудної варіабельності зубців ЕКС введено множину $I = \{P, Q, R, S, T\}$, що представляє типи характеристичних зубців сигналу. Для кожного типу зубців $k \in I$ та кожного циклу $m \in Z$ з кроком дискретизації $m - 1$ визначається амплітудне значення $A_k(m)$, яке представляє амплітуду відповідного зубця в межах відповідного кардіоциклу.

Математичну модель амплітудної варіабельності подано у вигляді функції $V_k(m)$, що враховує амплітудні значення характеристичних зубців ЕКС (P, Q, R, S і T)

$$V_k(m) = A_k(m) - A_k(m-1), \quad k \in \{P, Q, R, S, T\}, \quad m \in Z. \tag{1}$$

де $A_k(m)$ – амплітуда k-го типу зубця в m-му кардіоцикли (мВ);

$A_k(m-1)$ – амплітуда k-го типу зубця в попередньому валідному кардіоцикл (мВ).

$V_k(m)$ – значення функції амплітудної варіабельності зубців ЕКС, що відображає зміну амплітуди зубців k-го типу між поточним m та попереднім кардіоциклом (m-1).

У випадку, якщо попередній цикл (m-1) містить артефакт та виключений з обробки, для розрахунку функції амплітудної варіабельності використовується останній валідний цикл:

$$V_k(m) = \begin{cases} A_k(m-1) = NaN, & A_k(m) - A_k(p) \\ A_k(m-1) = numeric, & A_k(m) - A_k(m-1) \end{cases}, \quad k \in \{P, Q, R, S, T\}, \quad m, p \in Z. \tag{2}$$

де p – індекс останнього валідного циклу перед m-м кардіоциклом.

Функція амплітудної варіабельності $V_k(m)$ визначена на множині $I \times Z$, де I – множина типів зубців {P, Q, R, S, T}, а Z – множина індексів кардіоциклів. Дана функція характеризується наступними властивостями:

1. $V_k(m)$ може набувати як додатних, так і від'ємних значень, що відповідає збільшенню чи зменшенню амплітуди зубців від кардіоциклу до m-го кардіоциклу.
2. Для кожного типу k-го зубця функція $V_k(m)$ утворює послідовність значень $\{(A_k(m) - A_k(m-1)).\ m \in Z\}$.
3. У випадку нормального функціонування ССС значення $V_k(m)$ мають меншу варативність та амплітуду (в ідеалі прямує до 0), тоді як при патологічних станах спостерігаються значні відхилення та нерегулярність.

Метод обробки амплітудної варіабельності ЕКС. Для кількісної характеристики $V_k(m)$ та його діагностичної оцінки застосовано метод статистичної обробки, який уможливлює обчислення наступних статистичних показників:

1. Середнє значення $V_k(m)$для k-го типу зубців:

$$\mu_1(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} V_k(m). \tag{3}$$

2. Стандартне відхилення $V_k(m)$:

$$\sigma_1(k) = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\left(V_k(m) - \mu_1(k)\right)^2} \quad (4)$$

3. Коефіцієнт варіації $V_k(m)$:

$$CV_1(k) = \frac{\sigma_1(k)}{|\mu_1(k)|} \times 100\%. \quad (5)$$

4. Розмах значень (варіаційний розмах) $V_k(m)$:

$$Range(V_k(m)) = \max_m V_k(m) - \min_m V_k(m). \quad (6)$$

5. Індекс нестабільності амплітуд (ІНА) – частка циклів, у яких $V_k(m)$ перевищує певний поріг:

$$V_k(threshold) = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}[|V_k(m)| > threshold], \quad (7)$$

де $[|V_k(m)| > threshold]$ – індикаторна функція, яка дорівнює 1, якщо умова (стінка, і 0 – в іншому випадку.

Результати статичної обробки амплітудної варіабельності ЕКС. Для подальшого та обробки використано записи ЕКГ-сигналів здорових пацієнтів (діагноз: умовна норма) (рис. 1) та пацієнтів з діагностованою екстрасистолією (рис. 2).

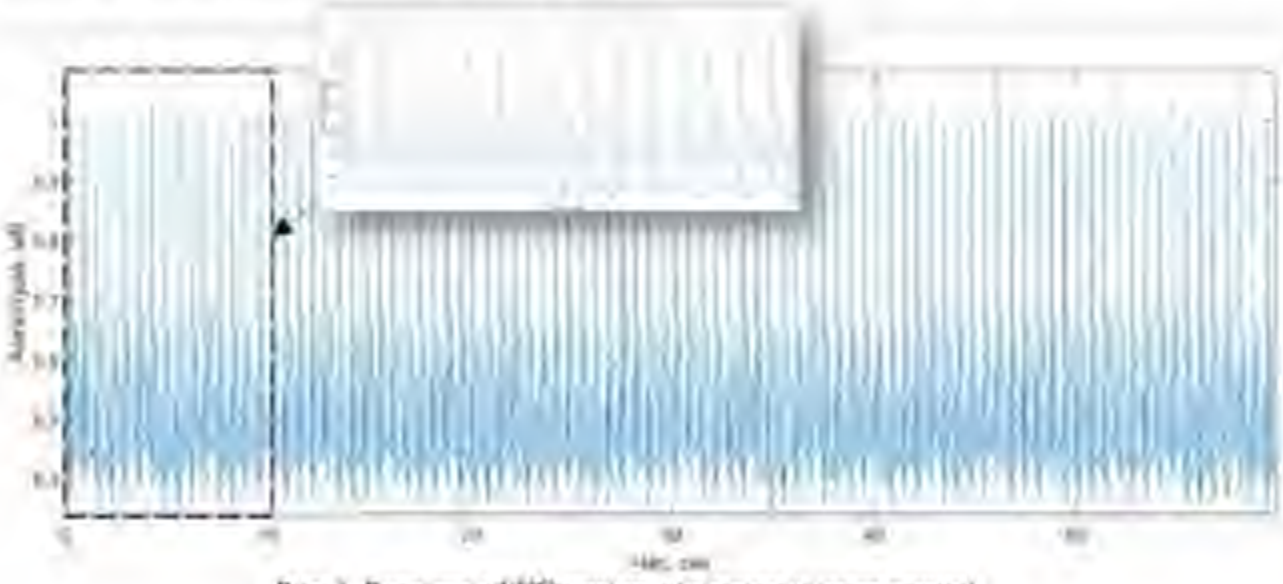


Рис. 1 Реалізація ЕКС пацієнта (діагноз: умовна норма)

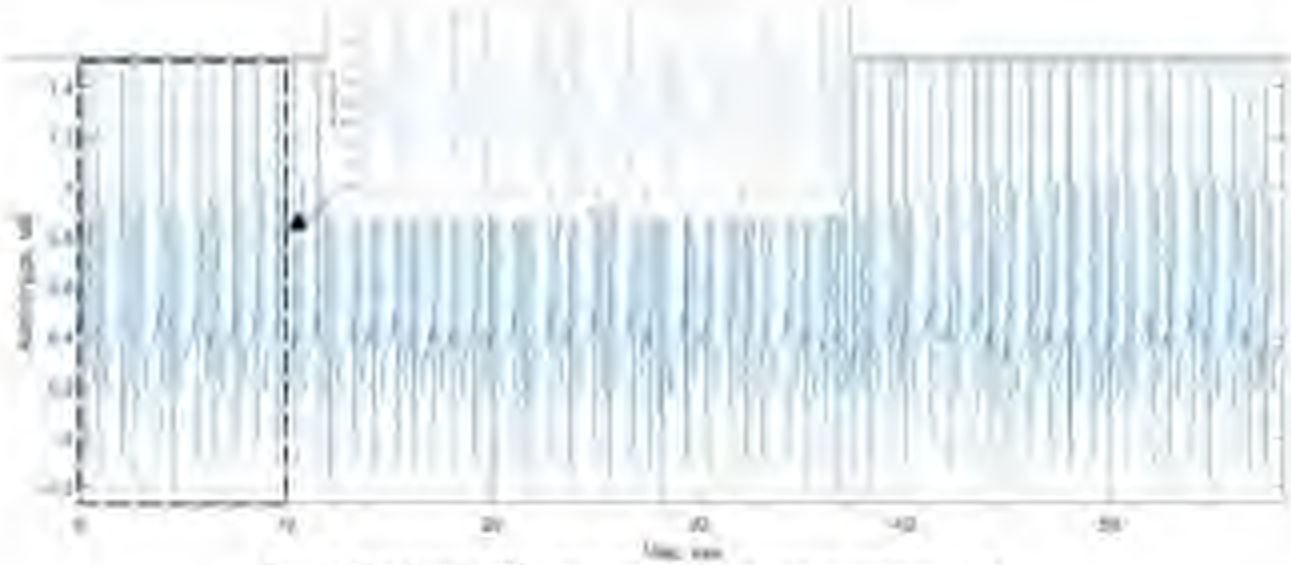


Рис. 2. Реалізація ЕКС пацієнта з діагнозом екстрасистолія

Приклад зміни амплітуди R-зубців ЕКГ-сигналу в *m*-му кардіоциклі *A(m)* (діагноз: умовна норма) зображено на рис. 3, а амплітудну варіабельність суседніх R-зубців *A(m) A(m 1)* (діагноз: умовна норма) зображено на рис.4.

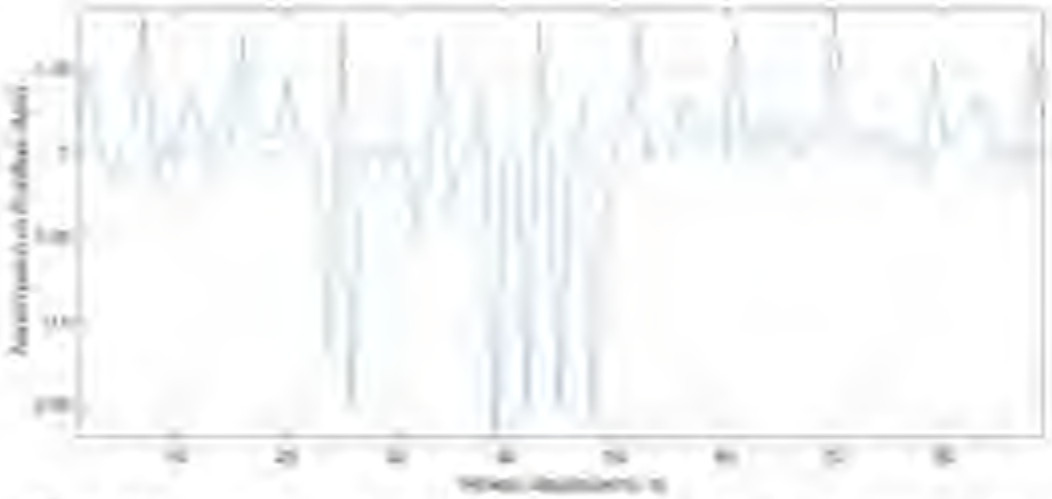


Рис. 3. Приклад зміни амплітуди R-зубців ЕКГ-сигналу в *m*-му кардіоциклі *A(m)* (діагноз: умовна норма)

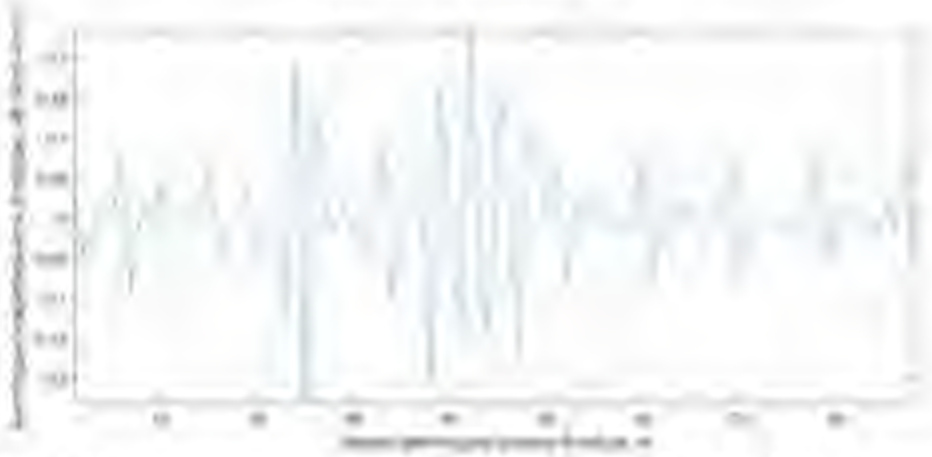


Рис. 4. Приклад амплітудної варіабельності суседніх R- зубців ЕКГ-сигналу пацієнта (діагноз: умовна норма)

На рис. 5 представлено графічні реалізації амплітудної варіабельності для зубця P ($V_P(m)$), зубця R ($V_R(m)$) та зубця T ($V_T(m)$) пацієнта з діагнозом умовна норма, а на рис.6 – пацієнта з екстрасистолією.

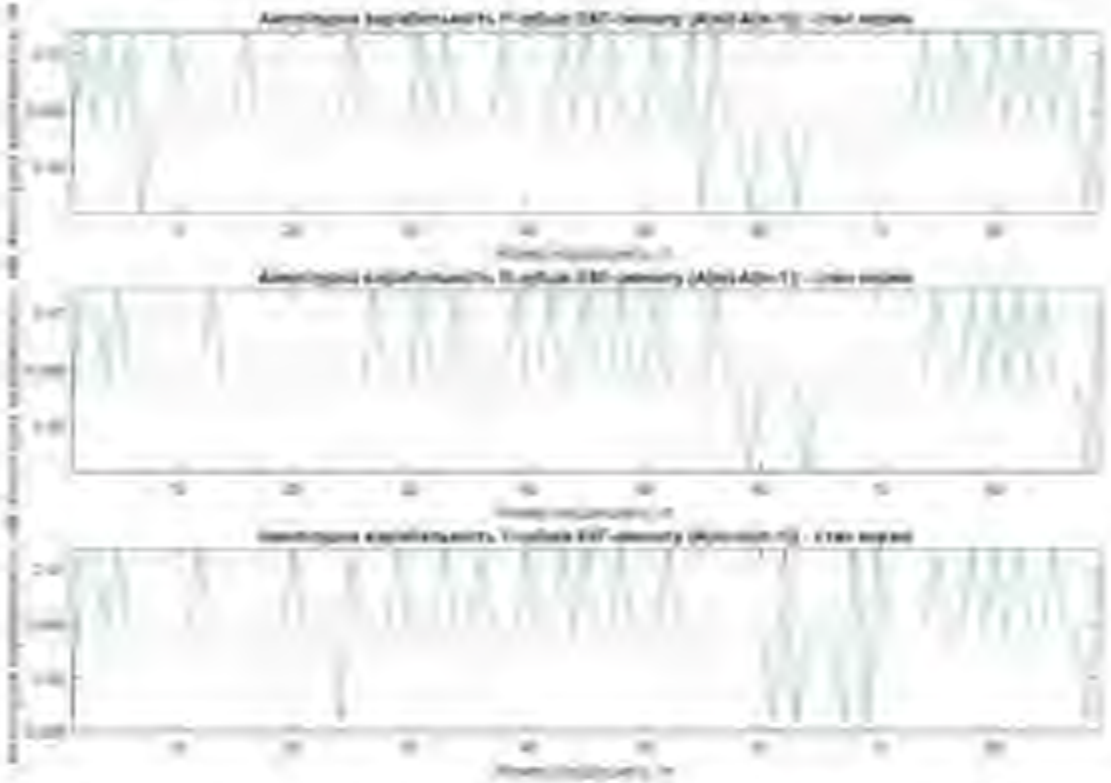


Рис. 5. Графічні реалізації амплітудної варіабельності ЕКГ-сигналів для зубця P, R та T пацієнта з діагнозом умовна норма

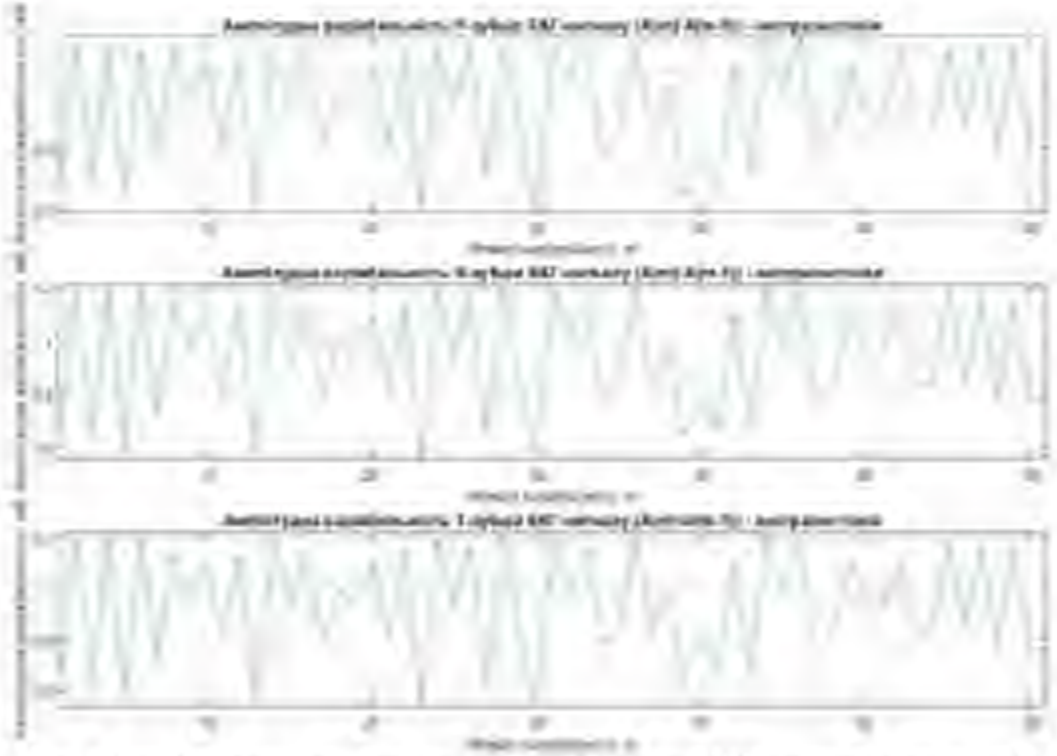


Рис. 6. Графічні реалізації амплітудної варіабельності ЕКГ-сигналів для зубця P, R та T пацієнта з екстрасистолією

Результати статистичної обробки показників функції амплітудної варіабельності для ЕКГ-сигналів здорових пацієнтів (діагноз: умовна норма) та пацієнтів з екстрасистолією згідно виразів (3–7) представлені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Статистичні характеристики показників функції амплітудної варіабельності ЕКГ-сигналу пацієнта (діагноз: умовна норма)

Тип зубця, k	$\mu_V(k)$, мВ	$\sigma_V(k)$, мВ	$CV_V(k)$, %	$\mathrm{Range}(V_k(m))$, мВ	IHA(k, 0,05 мВ), %
P	0,00077	0,05062	6551,38	0,319	0
R	0,00017	0,01204	7062,32	0,074	0
T	-0,00014	0,01148	8416,06	0,063	0

Таблиця 2. Статистичні характеристики показників функції амплітудної варіабельності ЕКГ-сигналу пацієнта з екстрасистолією

Тип зубця, k	$\mu_V(k)$, мВ	$\sigma_V(k)$, мВ	$CV_V(k)$, %	$\mathrm{Range}(V_k(m))$, мВ	IHA(k, 0,05 мВ), %
P	0,01473	0,89244	6057,26	3,743	0
R	0,03182	1,14941	3612,62	3,83	0
T	0,01408	0,80780	5735,87	3,911	0

Аналіз показників амплітудної варіабельності ЕКС, представлених у таблицях 1 і 2, виявляє значущі відмінності між показниками пацієнтів із нормальним серцевим ритмом та пацієнтів з діагностованою екстрасистолією. Середні значення функції амплітудної варіабельності ($\mu_V(k)$) у пацієнтів з нормальним серцевим ритмом характеризуються мінімальними відхиленнями від нуля для всіх типів зубців (P: 0,00077 мВ, R: 0,00017 мВ, T: -0,00014 мВ), що свідчить про високу стабільність амплітудних характеристик між послідовними кардіоциклами. Натомість у пацієнтів з екстрасистолією спостерігаються суттєво вищі значення (P: 0,01473 мВ, R: 0,03182 мВ, T: 0,01408 мВ), що відображає систематичну тенденцію до зміни амплітуд від циклу до циклу. Особливо показовими є відмінності у стандартному відхиленні ($\sigma_V(k)$), яке в нормі становить лише 0,05062 мВ, 0,01204 мВ та 0,01148 мВ для зубців P, R і T відповідно, тоді як при екстрасистолії ці значення зростають на порядок до 0,89244 мВ, 1,14941 мВ та 0,80780 мВ. Це вказує на значно вищу варіативність амплітудних показників між послідовними кардіоциклами при патологічному стані.

Коефіцієнт варіації ($CV_V(k)$) демонструє надзвичайно високі значення в обох групах, проте дещо нижчі при екстрасистолії. Це можна пояснити тим, що даний показник обчислюється як відношення стандартного відхилення до середнього значення, яке близьке до нуля, особливо в групі норми, що математично призводить до високих значень коефіцієнта варіації. Найбільш інформативним показником виявився розмах значень функції амплітудної варіабельності ($Range(V_k(m))$), який демонструє велику різницю між групами: у нормі він становить лише 0,319 мВ, 0,074 мВ та 0,063 мВ для зубців P, R і T відповідно, тоді як при екстрасистолії становить 3,743 мВ, 3,83 мВ та 3,911 мВ, що перевищує норму в середньому від 12 до 40 разів. Це свідчить про значно більшу амплітуду коливань характеристичних зубців ЕКС між послідовними кардіоциклами при екстрасистолії. Індекс нестабільності амплітуд (IHA) при пороговому значенні 0,05 мВ виявився нечутливим до розрізнення групи норми та патології, що вказує на необхідність встановлення вищого порогового значення для клінічно значущої оцінки вираженості амплітудної варіабельності.

Результати перевірки показників функції амплітудної варіабельності на відповідність нормальному розподілу для ЕКГ-сигналів здорових пацієнтів з екстрасистолією, виконаної за допомогою критеріїв Колмогорова-Смирнова (K-S d=0,06819, p>0,20), Ліллієфорса (Lilliefors p>0,20) та Шапіро-Уілка (Shapiro-Wilk W=0,98818, p=0,82968), представлені на рис. 7

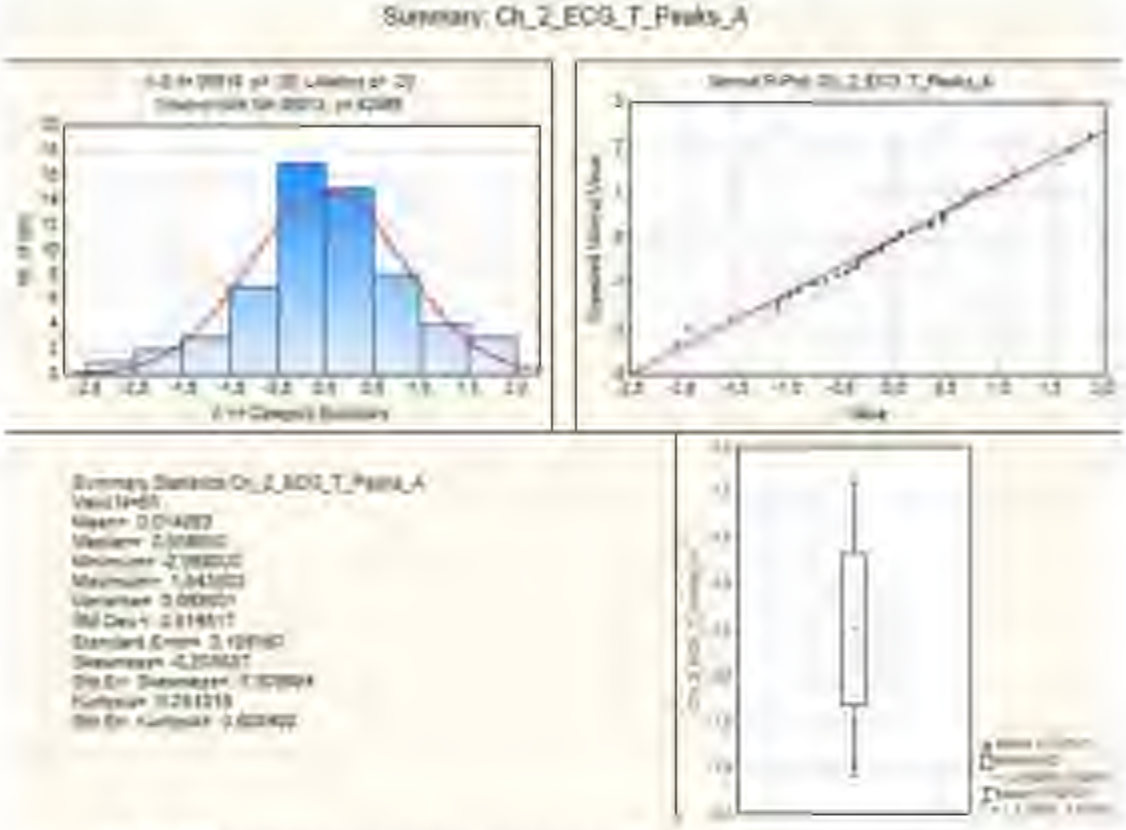


Рис. 7. Результати перевірки показника функції амплітудної варіабельності на відповідність нормальному розподілу для ЕКГ-сигналів здорових пацієнтів (діагноз: умовна норма)

Результат аналізу демонструє дуже високу відповідність нормальному розподілу: критерій Колмогорова-Смирнова (K-S d=0,06819, p>0,20) – p-значення значно перевищує пороговий рівень 0,05; критерій Лілліефорса (Lilliefors p>0,20) – підтверджує відповідність нормальному розподілу; критерій Шапіро-Уїлка (Shapiro-Wilk W=0,98818, p=0,82968) – найвище p-значення (0,82968) серед усіх представлених наборів даних, що вказує на надзвичайно добру відповідність нормальному розподілу. Візуальний аналіз також переконливо демонструє нормальність: гістограма має правильну симетричну дзвоноподібну форму, точки на нормальному ймовірнісному графіку майже ідеально лягають на теоретичну лінію, діаграма розмаху (box-plot) показує симетричний розподіл навколо медіани.

Інтеграція функцій амплітудної варіабельності в інформаційну технологію аналізу кардіосигналів. Впровадження функцій амплітудної варіабельності ЕКС у структуру розробленої інформаційної технології аналізу кардіосигналів забезпечить суттєве розширення діагностичного потенціалу автоматизованих систем кардіологічного моніторингу. Запропонована математична модель амплітудної варіабельності зубців ЕКС дасть змогу отримати додаткові діагностичні ознаки, що доповнять традиційний аналіз морфологічних та ритмічних характеристик кардіосигналів. Інтеграція обчислених показників амплітудної варіабельності ($\mu_T(k)$, $\sigma_T(k)$, $CV_T(k)$, $Range(V_T(n))$) у набір морфологічних та ритмічних ознак інформаційної системи дозволить реалізувати багатовимірну інтелектуальну обробку кардіологічних даних. На відміну від класичних підходів, які фокусуються переважно на статичних морфологічних параметрах одиничних кардіоциклів або часових R-R інтервалах, запропонований метод розширює діагностичні можливості за рахунок кількісної оцінки міжциклової динаміки амплітудних характеристик.

Архітектура інформаційної технології, доповнена модулем розрахунку показників амплітудної варіабельності, набуває здатності виявляти приховані патерни та аномалії, що не ідентифікуються при традиційному аналізі ЕКС. Програмна реалізація інформаційної технології з алгоритмом розрахунку функцій амплітудної варіабельності забезпечить цифрову трансформацію кардіодіагностики, створюючи передумови для розробки комплексних систем підтримки прийняття клінічних рішень. Інтегрування запропонованої математичної моделі в інформаційну технологію

аналізу кардіосигналів відкриває перспективи для реалізації предиктивних алгоритмів, здатних прогнозувати розвиток патологічних процесів на основі динаміки амплітудної варіабельності. Підтверджена статистична достовірність нормального розподілу показників функції амплітудної варіабельності (за критеріями Колмогорова-Смирнова, Ліллієфорса та Шапіро-Уілка) забезпечує надійність параметричних методів статистичного аналізу в рамках інформаційної технології.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У статті представлено розроблену математичну модель амплітудної варіабельності ЕКС у вигляді функції $V_i(m)$, що дозволяє кількісно оцінювати зміни амплітуд характеристичних зубців ЕКС (P, Q, R, S, T) між послідовними кардіоциклами. Запропонована модель враховує можливість наявності артефактів та забезпечує коректне обчислення значень у випадку виключення окремих кардіоциклів з обробки. Формалізовано метод обробки амплітудної варіабельності, що включає розрахунок середнього значення, стандартного відхилення, коефіцієнта варіації, розмаху значень та індексу нестабільності амплітуд, що у сукупності створює потужний інструментарій для аналізу міжциклових змін амплітуд ЕКС. Проведений порівняльний аналіз показників амплітудної варіабельності ЕКС здорових пацієнтів та пацієнтів з екстрасистолією виявив суттєві відмінності у кількісних характеристиках.

Зокрема, встановлено, що для пацієнтів з патологією розмах значень амплітудної варіабельності ($Range(V_i(m))$) від 12 до 40 разів перевищує відповідні значення у здорових пацієнтів. Середні значення функції амплітудної варіабельності близькі до нуля для здорових пацієнтів, тоді як для пацієнтів з екстрасистолією спостерігаються систематичні відхилення. Обробка показників функцій амплітудної варіабельності за критеріями Колмогорова-Смирнова, Ліллієфорса та Шапіро-Уілка підтвердила їх відповідність нормальному розподілу, що забезпечує надійність використання параметричних методів для їх оцінювання.

Запропонована інтеграція функції амплітудної варіабельності в архітектуру інформаційної технології аналізу кардіосигналів відкриває новий підхід до виявлення прихованих патернів та аномалій, що не ідентифікуються при традиційному аналізі ЕКС. Розроблена модель доповнює класичні методи аналізу, які здебільшого фокусуються на статичних морфологічних параметрах окремих кардіоциклів або часових R-R інтервалах, кількісною оцінкою міжциклової динаміки амплітудних характеристик.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з:

1. Розширенням математичної моделі для аналізу більш широкого спектру ССП і метою виявлення специфічних патернів амплітудної варіабельності для кожного типу захворювань.

2. Розробкою предиктивних алгоритмів діагностики ССП на основі динаміки амплітудної варіабельності ЕКС з використанням методів машинного навчання та нейронних мереж.

3. Створенням комплексної бази даних показників амплітудної варіабельності для різних патологічних станів ССС та її інтеграцією з існуючими системами підтримки прийняття клінічних рішень.

4. Клінічною валідацією розробленої моделі на розширеній вибірці пацієнтів різних вікових груп та патологій для оцінки її діагностичної чутливості та специфічності.

5. Удосконаленням методів обробки амплітудної варіабельності для підвищення стійкості до артефактів та шумів у реальних умовах клінічного застосування.

Реалізація цих напрямків досліджень створить передумови для суттєвого вдосконалення існуючих інформаційних технологій аналізу кардіосигналів та підвищення ефективності виявлення та прогнозування розвитку ССП.

Список бібліографічного опису:

1. Miller, A. C., Obermeyer, Z., & Mullainathan, S. (2018). Measuring the Stability of EHR- and EKG-based Predictive Models (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.1812.00210
2. Shang, H., Wei, S., Liu, F., Wei, D., Chen, L., & Liu, C. (2019). An Improved Sliding Window Area Method for T Wave Detection. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2019, 1–11. https://doi.org/10.1155/2019/3130527
3. Rubart, M. (2005). Mechanisms of sudden cardiac death. Journal of Clinical Investigation, 115(9), 2305-2315. https://doi.org/10.1172/jci26381
4. Myers, P. D., Scirica, B. M., & Stultz, C. M. (2017). Machine Learning Improves Risk Stratification After Acute Coronary Syndrome. Scientific Reports, 7(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-12951-x
5. Rueda, C., Larriba, Y., & Lamela, A. (2021). The hidden waves in the ECG uncovered revealing a sound automated interpretation method. Scientific Reports, 11(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-82520-w

6. Čukić, M., López, V., & Pavón, J. (2020). Classification of Depression Through Resting-State Electroencephalogram as a Novel Practice in Psychiatry: Review. Journal of Medical Internet Research, 22(11), e19548. https://doi.org/10.2196/19548
7. Arakaki, X., Arechavala, R. J., Choy, E. H., Bautista, J., Bliss, B., Molloy, C., Wu, D.-A., Shimojo, S., Jiang, Y., Kleinman, M. T., & Kloner, R. A. (2023). The connection between heart rate variability (HRV), neurological health, and cognition: A literature review. Frontiers in Neuroscience, 17. https://doi.org/10.3389/fnins.2023.[illegible]
8. Lupenko, S.A., Lytvynenko, I.V., & [illegible], V. (2021). Simulation of Cyclic Signals (Generalized Approach). 4th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine, November 19–21, 2021 Valencia, Spain.
9. Lupenko, S. (2023). The rhythm-adaptive Fourier series decompositions of cyclic numerical functions and one-dimensional probabilistic characteristics of cyclic random processes. In Digital Signal Processing (Vol. 140, p. 104104). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104104
10. Lupenko, S. (2024). Rhythm-adaptive statistical estimation methods of probabilistic characteristics of cyclic random processes. In Digital Signal Processing (Vol. 151, p. 104563). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104563
11. Lupenko, S., Lupenko, A., Lytvynenko, I., & Martsenyuk, V. (2020). Methods for Estimating the Discrete Rhythmic Structure of Cyclic Random Processes Using Adaptive Interpolation. In Advances in Intelligent Systems and Computing (pp. 614–627). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-[illegible]
12. Kapustin, R., Sverstiuk, A. Застосування дерев прийняття рішень для прогнозування настання серцевих захворювань. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, 2023, 51, 317-327.
13. Сверстюк, А. С. Обґрунтування та верифікація математичної моделі синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2009, 1, 143-147.
14. Лупенко, С., Зозуля, А., Сверстюк, А., & Стадник, Н. (2018). Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів. Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (20), (172), 47-54.
15. Литвиненко, Я. В., Лупенко, С. А., Дем'янчук, Н. Р., & Сверстюк, А. С. (2009). Імітаційне моделювання синхронно зареєстрованих сигналів серця на основі векторів циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів у задачах кардіодіагностики. Електроніка та системи управління К.: НАУ, (4), 22.
16. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of electrocardiogram classification and their mathematical model in the form of a cyclic discrete random process. Computer systems and information technologies. 2025, 1, pp. 88-99. https://doi.org/10.[illegible]
17. Luderer, W., Rheinberger, K., Lischke, V., & Amann, A. (2003). Analyse von Flimmersignalen zur Abschätzung der Defibrillierbarkeit beim Kammerflimmern [Review of Analyse von Flimmersignalen zur Abschätzung der Defibrillierbarkeit beim Kammerflimmern]. AINS - Anästhesiologie · Intensivmedizin · Notfallmedizin · Schmerztherapie, 38(12), 787. Georg Thieme Verlag. https://doi.org/10.1055/s-2003-[illegible]
18. Al-Zaiti, S. S., Martin-Gill, C., Zègre-Hemsey, J. K., Bouzid, Z., Faramand, Z., Alrawashdeh, M. O., Gregg, R. E., Helman, S., Riek, N. T., Kraevsky-Phillips, K., Clermont, G., Akcakaya, M., Sereika, S. M., Van Dam, P., Smith, S. W., Birnbaum, Y., Saba, S., Sejdic, E., & Callaway, C. W. (2023). Machine learning for ECG diagnosis and risk stratification of occlusion myocardial infarction. Nature Medicine, 29(7), 1804–1813. https://doi.org/10.1038/s41591-023-02396-3
19. Su, S., Zhu, Z., Wan, S., Sheng, F., Xiong, T., Shen, S., Hou, Y., Liu, C., Li, Y., Sun, X., & Huang, J. (2023). An ECG Signal Acquisition and Analysis System Based on Machine Learning with Model Fusion. Sensors, 23(17), 7643. https://doi.org/10.3390/s23177643
20. Zhao, Z. (2023). Transforming ECG Diagnosis: An In-depth Review of Transformer-based DeepLearning Models in Cardiovascular Disease Detection (Version 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.[illegible]
21. Jo, Y.-Y., Choi, Y. S., Jang, J.-H., & Kwon, J.-M. (2021). Towards Synthesizing Twelve-Lead Electrocardiograms from Two Asynchronous Leads. arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.[illegible]
22. Adib, E., Afghah, F., & Prevost, J. J. (2022). Arrhythmia Classification using CGAN-augmented ECG Signals (Version 4). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.[illegible]
23. Hatamian, F. N., Ravikumar, N., Vesal, S., Kemeth, F. P., Struck, M., & Maier, A. (2020). The Effect of Data Augmentation on Classification of Atrial Fibrillation in Short Single-Lead ECG Signals Using Deep Neural Networks. In ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 1264–1268). ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. https://doi.org/10.1109/icassp40776.2020.[illegible]
24. Pereira, H., Niederer, S., & Rinaldi, C. A. (2020). Electrocardiographic imaging for cardiac arrhythmias and resynchronization therapy. EP Europace, 22(10), 1447–1462. https://doi.org/10.1093/europace/[illegible]
25. Finocchiaro, G., Sheikh, N., Biagini, E., Papadakis, M., Maurizi, N., Sinagra, G., Pelliccia, A., Rapezzi, C., Sharma, S., & Olivotto, I. (2020). The electrocardiogram in the diagnosis and management of patients with hypertrophic cardiomyopathy. Heart Rhythm, 17(1), 142–151. https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2019.07.019
26. Winkler, C. (2015). Electrocardiographic monitoring for cardiovascular dysfunction. In Critical Care Nursing (pp. 57–72). Wiley. https://doi.org/10.1002/[illegible]
27. Chahine, Y., Magoon, M. J., Maidu, B., del Álamo, J. C., Boyle, P. M., & Akoum, N. (2023). Machine Learning and the Conundrum of Stroke Risk Prediction. Arrhythmia & Electrophysiology Review, 12. https://doi.org/10.15420/aer.2022.34
28. Lima, J. L. P., Macedo, D., & Zanchettin, C. (2019). Heartbeat Anomaly Detection using Adversarial Oversampling. In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (pp. 1–7). 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE. https://doi.org/10.1109/ijcnn.2019.8852242

29. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of modeling and classification of electrocardiograms. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 58, pp. 104-115). Lutsk National Technical University. DOI: [illegible]
30. Nedashkivskyi, S. (2024). Методологія та принципи виявлення об'єктів за допомогою деформованих згорткових мереж. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 54, pp. 153-159). Lutsk National Technical University. [illegible]
31. Silva, P., Luz, E., Silva, G., Moreira, G., Wanner, E., Vidal, F., & Menotti, D. (2020). Towards better heartbeat segmentation with deep learning classification. Scientific Reports, 10(1). [illegible]
32. Singh, S., Chaudhary, R., Bhuksar, K. P., Tantry, U. S., Gurbel, P. A., Vaseswaran, S., & Herzstein, M. U. (2024). Meta-Analysis of the Performance of AI-Driven ECG Interpretation in the Diagnosis of Valvular Heart Diseases. The American Journal of Cardiology, 213, 126–131. [illegible]
33. Abubakar, S. A., Sverstiuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In Computer systems and information technologies (Issue 3, pp. 6-16). Khmelnytskyi National University. [illegible]
34. Bernyk, K., Yavorskyi, B., Bahanuk, N., & Palii, P. (2023). Overcoming challenges in artificial intelligence training: data limitations, computational costs and model robustness. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 53, pp. 37-43). Lutsk National Technical University. [illegible]
35. Chowdhury, M. A., Rizk, R., Chiu, C., Zhang, J. J., Scholl, J. L., Bosch, T. J., Singh, A., Baugh, L. A., McGough, J. S., Santosh, K., & Chen, W. C. W. (2025). The Heart of Transformation: Exploring Artificial Intelligence in Cardiovascular Disease. Biomedicines, 13(2), 427. [illegible]

References:

1. Miller, A. C., Obermeyer, Z., & Mullainathan, S. (2018). Measuring the Stability of EHR- and EKG-based Predictive Models (Version 1). arXiv. [illegible]
2. Shang, H., Wei, S., Liu, F., Wei, D., Chen, L., & Liu, C. (2019). An Improved Sliding Window Area Method for T Wave Detection. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2019, 1–11. [illegible]
3. Rubart, M. (2005). Mechanisms of sudden cardiac death. Journal of Clinical Investigation, 115(9), 2305–2315. [illegible]
4. Myers, P. D., Scirica, B. M., & Stultz, C. M. (2017). Machine Learning Improves Risk Stratification After Acute Coronary Syndrome. Scientific Reports, 7(1). [illegible]
5. Ruiz, C., Larrión, Y., & Larrión, A. (2021). The hidden waves in the ECG uncovered revealing a sound automated interpretation method. Scientific Reports, 11(1). [illegible]
6. Čukić, M., López, V., & Pavón, J. (2020). Classification of Depression Through Resting-State Electroencephalogram as a Novel Practice in Psychiatry: Review. Journal of Medical Internet Research, 22(11), e19548. [illegible]
7. Arakaki, X., Arechavala, R. J., Choy, E. H., Bautista, J., Bliss, B., Molloy, C., Wu, D.-A., Shimojo, S., Jiang, Y., Kleinman, M. T., & Kloner, R. A. (2023). The connection between heart rate variability (HRV), neurological health, and cognition: A literature review. Frontiers in Neuroscience, 17. [illegible]
8. Lupenko, S.A., Lytvynenko, I.V., & Hotovych, V. (2021). Simulation of Cyclic Signals (Generalized Approach). 4th International Conference on Informatics & Data-Driven Medicine. November 19–21, 2021 Valencia, Spain
9. Lupenko, S. (2023). The rhythm-adaptive Fourier series decompositions of cyclic numerical functions and one-dimensional probabilistic characteristics of cyclic random processes. In Digital Signal Processing (Vol. 140, p. 104104). Elsevier BV. [illegible]
10. Lupenko, S. (2024). Rhythm-adaptive statistical estimation methods of probabilistic characteristics of cyclic random processes. In Digital Signal Processing (Vol. 151, p. 104563). Elsevier BV. [illegible]
11. Lupenko, S., Lupenko, A., Lytvynenko, I., & Martsenyuk, V. (2020). Methods for Estimating the Discrete Rhythmic Structure of Cyclic Random Processes Using Adaptive Interpolation. In Advances in Intelligent Systems and Computing (pp. 614-627). Springer International Publishing. [illegible]
12. Kapitula, R., Sverstiuk, A. Zastosuvannia derev pryiniattia rishen dlia prohnozuvannia rozvytku sertsevykh zakhvoriuvan. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, 2023, 53, 317-327.
13. Sverstiuk, A. S. Obgruntuvannia ta veryfikatsiia matematychnoi modeli synkhronno zarieiestrovanykh kardiosyhnaliv z vykorystanniam vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, 2009, 1: 143-147.
14. Lupenko, S., Zozulia, A., Sverstiuk, A., & Stadnyk, N. (2018). Matematychne modeliuvannia ta metody opratsiuvannia syhnaliv sertsia na osnovi tsyklichnykh vypadkovykh protsesiv ta poliv. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI (20), (172), 47-54.
15. Lytvynenko, Ya. V., Lupenko, S. A., Dem'ianchuk, N. R., & Sverstiuk, A. S. (2011). Imitatsiine modeliuvannia synkhronno zarieiestrovanykh syhnaliv sertsia na osnovi vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv u zadachakh kardiodiahnostyky. Elektronika ta systemy upravlinnia–K.: NAU, (4), 22.
16. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of electrocardiogram classification and their mathematical model in the form of a cyclic discrete random process. Computer systems and information technologies, 2025, 1, pp. 88-99. [illegible]
17. Lederer, W., Rheinberger, K., Lisekke, V., & Amann, A. (2003). Analyse von Flimmersignalen zur Abschätzung der Defibrillierbarkeit beim Kammerflimmern [Review of Analyse von Flimmersignalen zur Abschätzung der Defibrillierbarkeit beim Kammerflimmern]. AINS - Anästhesiologie · Intensivmedizin · Notfallmedizin · Schmerztherapie, 38(12), 787. Georg Thieme Verlag. [illegible]

18. Al-Zaiti, S. S., Martin-Gill, C., Zègre-Hemsey, J. K., Bouzid, Z., Faramand, Z., Alrawashdeh, M. O., Gregg, R. E., Helman, S., Riek, N. T., Kraevsky-Phillips, K., Clermont, G., Akcakaya, M., Sereika, S. M., Van Dam, P., Smith, S. W., Birnbaum, Y., Saba, S., Sejdic, E., & Callaway, C. W. (2023). Machine learning for ECG diagnosis and risk stratification of occlusion myocardial infarction. Nature Medicine, 29(7), 1804–1813. https://doi.org/10.1038/s41591-023-02396-3
19. Su, S., Zhu, Z., Wan, S., Sheng, F., Xiong, T., Shen, S., Hou, Y., Liu, C., Li, Y., Sun, X., & Huang, J. (2023). An ECG Signal Acquisition and Analysis System Based on Machine Learning with Model Fusion. Sensors, 23(17), 7643. [illegible]
20. Zhao, Z. (2023). Transforming ECG Diagnosis: An In-depth Review of Transformer-based DeepLearning Models in Cardiovascular Disease Detection (Version 1). arXiv. [illegible]
21. Jo, Y.-Y., Choi, Y. S., Jang, J.-H., & Kwon, J.-M. (2021). Towards Synthesizing Twelve-Lead Electrocardiograms from Two Asynchronous Leads. arXiv. [illegible]
22. Adib, E., Afghah, F., & Prevost, J. J. (2022). Arrhythmia Classification using CGAN-augmented ECG Signals (Version 4). arXiv. [illegible]
23. Hatamian, F. N., Ravikumar, N., Vesal, S., Kemeth, F. P., Struck, M., & Maier, A. (2020). The Effect of Data Augmentation on Classification of Atrial Fibrillation in Short Single-Lead ECG Signals Using Deep Neural Networks. In ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 1264–1268). ICASSP 2020 - 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE. [illegible]
24. Pereira, H., Niederer, S., & Rinaldi, C. A. (2020). Electrocardiographic imaging for cardiac arrhythmias and resynchronization therapy. EP Europace, 22(10), 1447–1462. [illegible]
25. Finocchiaro, G., Sheikh, N., Biagini, E., Papadakis, M., Maurizi, N., Sinagra, G., Pelliccia, A., Rapezzi, C., Sharma, S., & Olivotto, I. (2020). The electrocardiogram in the diagnosis and management of patients with hypertrophic cardiomyopathy. Heart Rhythm, 17(1), 142–151. [illegible]
26. Winkler, C. (2015). Electrocardiographic monitoring for cardiovascular dysfunction. In Critical Care Nursing (pp. 57–72). Wiley. [illegible]
27. Chahine, Y., Magoon, M. J., Maidu, B., del Álamo, J. C., Boyle, P. M., & Akoum, N. (2023). Machine Learning and the Conundrum of Stroke Risk Prediction. Arrhythmia & Electrophysiology Review, 12. [illegible]
28. Lima, J. L. P., Macedo, D., & Zanchettin, C. (2019). Heartbeat Anomaly Detection using Adversarial Oversampling. In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN) (pp. 1–7). 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE. [illegible]
29. L. Mosiy, A. Sverstiuk. Methods of modeling and classification of electrocardiograms. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 58, pp. 304–315). Lutsk National Technical University. DOI: [illegible]
30. Nedoshkovskyi, S. (2024). Metodolohiia ta pryntsypy vyiavlennia obiektiv za dopomohoiu deformovanykh zghortkovykh merezh. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 54, pp. 153–159). Lutsk National Technical University. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-18
31. Silva, P., Luz, E., Silva, G., Moreira, G., Wanner, E., Vidal, F., & Menotti, D. (2020). Towards better heartbeat segmentation with deep learning classification. Scientific Reports, 10(1). [illegible]
32. Singh, S., Chaudhary, R., Bliden, K. P., Tantry, U. S., Gurbel, P. A., Visweswaran, S., & Harinstein, M. E. (2024). Meta-Analysis of the Performance of AI-Driven ECG Interpretation in the Diagnosis of Valvular Heart Diseases. The American Journal of Cardiology, 213, 126–131. [illegible]
33. Abubakar, S. A., Sverstyuk, A. (2024). Analytical review of publications on machine learning methods in oncology and approach to evaluating their quality. In Computer systems and information technologies (Issue 1, pp. 5–[illegible]). Khmelnytskyi National University. [illegible]
34. Bortnyk, K., Yaroshchuk, D., Bahniuk, N., & Pekh, P. (2023). Overcoming challenges in artificial intelligence training: data limitations, computational costs and model robustness. In COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION (Issue 53, pp. 37–43). Lutsk National Technical University. [illegible]
35. Chowdhury, M. A., Rizk, R., Chiu, C., Zhang, J. J., Scholl, J. L., Bosch, T. J., Singh, A., Baugh, L. A., McGough, J. S., Santosh, K., & Chen, W. C. W. (2025). The Heart of Transformation: Exploring Artificial Intelligence in Cardiovascular Disease. Biomedicines, 13(2), 427. [illegible]

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-30
УДК 004.725.5:004.056
Ухань Єгор Олександрович, аспірант
https://orcid.org/0000-0002-3384-0103
Журавська Ірина Миколаївна, д-р техн. наук, проф.
https://orcid.org/0000-0002-8102-9854
Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

ФОРМУВАННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ЗОН У ЛОКАЛЬНИХ БЕЗДРОТОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

Ухань Є. О., Журавська І. М. Формування контрольованих зон у локальних бездротових комп'ютерних мережах. Досліджено формування контрольованих зон (КЗ згідно з НД ТЗІ 3.1-03(1-07)) у локальних бездротових комп'ютерних мережах на базі WiFi-технології. Розглянуто актуальність проблеми, пов'язаної з несанкціонованого доступу. Проведено аналіз методів (фізичних, програмних) формування КЗ, висвітлено особливості цих методів та способи їх реалізації. Особливу увагу приділено аналізу доцільності використання протоколу WPA3 на заміну більш старих протоколів безпеки типу (WPA, WPA2), а також його переваги у захисті від атак різних видів. У контексті розвитку технології Wi-Fi було розглянуто перспективні можливості майбутнього стандарту WPA4, який, за попередніми дослідженнями IEEE, повинен посилити захист за рахунок штучного інтелекту. Також протокол WPA4 буде впроваджувати мінімізації загроз з боку квантових систем і містити набір різних видів ключів для активної протидії. Обґрунтовано використання комбінованого методу формування КЗ, який включає в себе як фізичні (стримувальні бар'єри, шлюзи) так і програмні (сегментація мережі за допомогою VLAN, впровадження WIDS моніторингу). Визначено важливість та доцільність цього підходу для забезпечення безпеки, як метод захисту. Результати дослідження підкреслюють необхідність та можливість впровадження розглянутих методів при розгортанні сучасного мережевого середовища.

Ключові слова: контрольовані зони, бездротова комп'ютерна мережа, Wi-Fi, локальна обчислювальна мережа, VLAN, WIDS, WPA3, WPA4, датчики.

Ukhan Ye., Zhuravska I. Forming Controlled Zones in Local Wireless Computer Networks. The formation of controlled security zones (Controlled Access Area according to CNSSI 4009-2015) in local wireless computer networks based on Wi-Fi technology is investigated. The problem's urgency, caused by the need to protect against unauthorized access, is considered. The methods (physical, software) for forming CZs were analyzed, and the characteristics of these methods and the means of their implementation are highlighted. Special attention has been paid to the analysis of the feasibility of using WPA3 to replace outdated security protocols (WPA, WPA2), as well as its advantages in combating various types of attacks. In the context of technology development, the promising capabilities of the future WPA4 standard, according to the latest IEEE research, were examined. It will strengthen protection mechanisms through artificial intelligence. Also, protocol WPA4 considers potential threats from quantum systems and contains a database of attacks of various types for active counteraction. The use of a combined method of CTA formation (including physical (structural barriers, gateways) and software (network segmentation using VLAN, implementation of WIDS monitoring)) is substantiated. The importance and usefulness of training personnel in the principles of security as a method of protection have been emphasized. The research results have emphasized the need and possibility of implementing these methods when deploying a modern network environment.

Keywords: controlled access area, wireless computer network, Wi-Fi, LAN, VLAN, WIDS, WPA3, WPA4, sensors.

Постановка наукової проблеми. В умовах технологічного розвитку бездротових комп'ютерних мереж (БКМ) таких як Wi-Fi, критичним завданням є забезпечення ефективного покриття, захист від несанкціонованого доступу (НСД) до інформації та адаптивність системи. Збільшення кількості клієнтів системи та варіативність пристроїв, а також зміни у правилах та нормах інформаційної безпеки, потребують створення гнучких методів створення контрольованих зон (КЗ, англ. Control Area or CTA) покриття мережі.

На сьогодні існуючі методи до формування КЗ у БКМ не відповідають усім вимогам, а саме: відсутність або складність в інтеграції з системами кібербезпеки, низький рівень гнучкості до змін у навантаженні або покритті, певні обмеження до масштабованості.

З цього випливає потреба у нових або вдосконалених методах формування КЗ у БКМ, які б відповідали таким вимогам:

- належний рівень кібербезпеки;
- гнучкість до змін у мережі;
- дружність керування та масштабування мережі;
- ефективний розподіл ресурсів мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток БКМ приверну значну увагу дослідників до вивчення можливих шляхів вирішення проблеми ефективного контролю зон мережі,

адміністрування та стабільності роботи. Формування КЗ виділяють як один з ключових методів забезпечення кібербезпеки та захисту від НСД.

У працях вітчизняних та зарубіжних авторів одним з практичних підходів висвітлюється використання технології машинного навчання (МН) для визначення контрольованих зон в бездротових мережах.

У статті [1] продемонстровано підхід для аналізу та прогнозуванню можливих ризиків в БКМ на базі МН. Головним елементом який запропонували автори є вдосконалений баєсів класифікатор, що дало змогу у реальному часі виявляти та класифікувати рівні загрози. За результатами дослідження продемонстрована доцільність використання динамічної аналітики трафіку для формування динамічних КЗ.

У роботі [2] запропонували новий підхід для керування ресурсами в БКМ. Головна риса запропоновано підходу базується на представленні мережі як гетерогенний граф, де кожна точка доступу має свої особливості, за допомогою цього була отримана можливість точного моделювання взаємодій у мережі.

Важливою ланкою у наукових дослідженнях є праці щодо Software-Defined Networking (SDN) та Network Functions Virtualization (NFV). Головною метою зазначених технологій є покращення існуючих методів управління БКМ за допомогою нових математичних моделей. Одну з таких аналітичних моделей розглянуто у праці [3]. В праці підкреслюються можливості концепції значно покращити показники адаптивності та зменшення витрат на підтримання БКМ. Запропоновані методи математичного моделювання ефективності даних систем, що дозволить зменшити час відповіді, збільшити пропускну здатність та провести оптимізацію мережевих ресурсів. На жаль, на даний час ці моделі непридатні для використання у бездротових локальних обчислювальних мережах (ЛОМ) на основі Wi-Fi, але отримали застосування для технологій розгортання та розширення 5G-мереж.

Метод формування КЗ, який надає найкращі показники у захисті, є побудова клітки Фарадея. Але, як видно з праць дослідників з Негевського університету Бен-Гуріона (Ізраїль) [5], які досліджували можливість НСД на комп'ютерні мережі, захищені клітками Фарадея, були знайдені можливі шляхи витоку інформації. Як видно з їх досліджень, для отримання НСД використовуються магнітні поля, які проходять крізь клітку Фарадея. Їх практичні експерименти довели можливість контролю магнітних полів процесорів приладів в середині клітки Фарадея, а також передавання через низькочастотне магнітне випромінювання інформації на приймач, за межами КЗ. У своїй роботі вони приводять шляхи протидії та принципи моніторингу такої загрози, а саме:

- додаткове магнітне екранування;
- моніторинг випромінення магнітних полів від приладів у клітці Фарадея;
- збір аналітичних даних роботи процесора для виявлення аномальних змін навантаження;
- забезпечення відсутності поблизу КЗ несанкціонованих пристроїв.

Як розвиток технології по використанню кліток Фарадея, науковці з Університету штату Айова (США) провели дослідження із залізовмісними матеріалами *Fe, Fe_2O_3, Fe_3O_4*, карбонільним залізом, *FeO* для оцінки їх потенціалу у відбитті та поглинанні електромагнітних хвиль [6]. Були розглянуті різні методи синтезу та спроби створення композитних матеріалів, які можуть бути синтезовані шляхом поєднання залізовмісних з діелектричними та можливості використання полімерних та вуглецевих наноматеріалів для покращення властивостей кліток Фарадея.

Необхідно зазначити, що аналіз літературних джерел, приведених рівень та методів, свідчить про актуальність проблеми методів побудови КЗ у БКМ. Але доцільно сфокусувати подальші дослідження на знаходження нових або вдосконалені наявних методів та практик задля підвищення захищеності сегментів WiFi-мереж від нових типів атак та НСД.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є аналіз та розробка методів формування КЗ у БКМ для покращення ефективності роботи мережі, захисту від НСД та зменшення необхідних ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Контрольовані зони у бездротових комп'ютерних мережах – це фізична або віртуальна область, усередині якої забезпечується захист від витоку інформації та від несанкціонованого доступу до персональних даних та пристроїв. Методи побудови таких контрольованих зон можна розділити на фізичні та програмні за принципом їх роботи (табл. 1).

Таблиця 1. Методи формування КЗ

Фізичні	**Програмні**
Регулювання потужності передавача	Мережева аутентифікація
Використання спрямованих антен	VLAN (віртуальні локальні мережі)
Зонування за допомогою джаммерів	WIDS-моніторинг несанкціонованих пристроїв

Регулювання потужності передавача відбувається на рівні прошивки телекомунікаційного пристрою, на базі якого розгортається сегмент мережі: для прикладу розглянемо маршрутизатор від компанії Mikrotik, а саме RB951Ui-2^{HnD} [7]. Його максимальна потужність передавача складає 22 dBm, а мінімальна 6 dBm. Регулювання відбувається з прав адміністратора через офіційний застосунок Winbox або через вебінтерфейс, що дозволяє зменшити зону покриття до однієї кімнати. Застосований метод може допомогти розгортанню безпечних локальних мережу невеликих офісах або у приватних приміщеннях, але не підходить для підприємств.

Мережева аутентифікація давно є стандартом у кожній точці доступу та маршрутизаторі. Існують чотири версії протоколу безпеки для захисту бездротових мереж Wi-Fi Protected Access (WPA): WPA, WPA2, WPA3, WPA4 (табл. 2). На сьогодні більшість пристроїв працюють на WPA2, який не надає надійного захисту та має багато недоліків з боку безпеки. Головною загрозою з 2017 р. для цього протоколу є атаки з перевстановленням ключа (англ. Key Reinstallation Attack, KRACK). Під час такої атаки пристрій підключається до Wi-Fi через захищений WPA2. Перевірка відбувається через процес 4-way handshake (процес обміну чотирма повідомленнями між точкою доступу – Автентифікатором – і клієнтським пристроєм – Заявником – для створення деяких ключів шифрування, які можна використовувати для шифрування фактичних даних, надісланих через бездротове середовище) [8]. Під час цього обміну зловмисник має можливість перехопити й повторно пройти частину процесу, що може привести до перехоплення даних: логін, паролі та ін. [9; 10].

Таблиця 2. Порівняння стандартів захисту технології Wi-Fi

Характеристика	**WPA**	**WPA2**	**WPA3**	**WPA4**
Рік випуску	2003	2004	2018	2026–2028
Ключ шифрування, біт	64	128	192 / 256	256
Протокол аутентифікації	TKIP+RC4	802.1X / EAP	SAE	NIST, Zero Trust
Захист від розподілених атак на відмову в обслуговуванні (DDoS)	Відсутній	Відсутній	С	Є (за рахунок ШІ для аналізу та активної протидії)
Захист від атак перехоплення (Man-in-the-Middle)	Відсутній	Відсутній	Захист за допомогою аутентифікації на основі обміну пакетами	Динамічна зміна рівнів шифрування в залежності від типу атаки
Підтримка застосування на пристроях, випущених до 2018 р.	Відсутня	Відсутня	Можливість роботи в режимі «WPA3-перехід» для підтримки пристроїв, випущених до 2018 р.	Не визначено: технологія ще у розробці

Для захисту від KRACK-атак у 2018 р. було створено протокол безпеки WPA3, який використовує новий тип шифрування SAE (Simultaneous Authentication of Equals). В зазначеному методі одночасної рівноправної автентифікації кожна сесія індивідуально шифрується для захисту від перехоплення даних. Головною складністю для введення у роботу WPA3 є відсутність даного протоколу на пристроях, які розроблені до 2018 р. [11; 12].

У 2019 р. була сформована робоча група IEEE 802.11be, яка досліджує та аналізує новітні технології Wi-Fi 7 та WPA4 [12]. Відмінною WPA4 від попередніх версій протоколу стануть новітні

рішення у механізмах аутентифікації та безпеки. Головним інструментом є впровадження більш просунутих технологій шифрування, які будуть базуватися на квантових обчисленнях. Для протидії DDoS-атакам досліджується можливість використання штучного інтелекту (ШІ) [13; 14], який буде аналізувати атаку та чинити активну протидію. Також у WPA4 планується спростити процес підключення й при цьому підвищити рівень безпеки. Головним інструментом, як вважають дослідники, стане покращений принцип криптографії з відкритим ключем. Дослідники вважають, що WPA4 зможе вирішити проблеми, пов'язані з атаками погодження часу, пам'яті та даних (англ. Time Memory Trade-Off, TMTO).

Однією з технологій, що мають перспективу для захисту окремих сегментів в бездротовій ЛОМ, є створення логічно відокремлених віртуальних локальних мереж (англ. Virtual Local Area Network, VLAN). В такому разі фізичну мережу розділяють на декілька віртуальних, в яких сформовано окремі політики доступу до інформації для різних типів працівників та відвідувачів:

а) VLAN 10 – гостьові користувачі;
б) VLAN 20 – співробітники з низьким доступом;
в) VLAN 30 – співробітники з привілейованим доступом;
г) VLAN 40 – керівництво;
д) VLAN 50 – сервери.

Розмежування даного типу захищає дані від зловмисників як зовні, так і в середині, оскільки зловмисник, отримавши доступ до одного сегменту мережі, не отримає повної інформації про всю мережу та дані.

Завдяки одночасного використання WIDS-моніторингу бездротової мережі, під час якого проводиться аналіз радіоефіру у пошуках підозрілих приладів або НСД, проводиться фільтрацію MAC-адрес по «білому списку» (список MAC-адрес приладів, які дозволені у мережі) та перевіряється їх активність. Головна задача даних систем – сповістити адміністраторів про порушення КЗ або автоматично вжити заходів протидії (блокувати відфільтровані MAC-адреси). Такі системи в залежності від налаштувань здатні виявити [15–17]:

- фальшиві точки доступу (англ. Rogue AP),
- копії точок доступу по типу «злого двійника» (англ. Evil Twin AP),
- пристрої сканування мережі,
- пристрої, які спрямовані на атаки типу DDoS й та ін.

У разі потреби покрити WiFi-сигналом певну вузьку КЗ, без потреби у покритті на 360 градусів, доцільно використання спрямованих антен, які передають сигнал у конкретному напрямку. Застосування певного типу антен обумовлено кутом огляду, який забезпечується у кожному форм-факторі (табл. 3).

Таблиця 3. Порівняння кутів огляду спрямованих антен

Тип антени	Кут огляду, град.
Панельна	60–90
Типу «Yagi»	20–30
Параболічна	5–10
Секторна	60–120

У випадку, коли немає можливості зменшити потужність передачі чи встановити спрямовану антену, актуальним є використання джаммерів. За допомого джаммерів створюється обмеження КЗ за рахунок блокування сигналу та ізолюються об'єкти, де циркулює інформація з обмеженим доступом (дата-центр, конференц-зали тощо). Потужність джаммерів легко контролювати, що надає велику адаптивність зазначеній технології. Джаммери є потужним інструментом для обмеження зони покриття бездротового сигналу, але його використання потребує обережності, точності налаштувань і дотримання законодавства.

Для побудови КЗ з найкращими показниками безпеки та адаптивності доцільно використовувати комбінований метод формування КЗ, який об'єднує різні типи захисту для підвищення загального рівня захисту. Розглянута методологія захисту при розгортанні ізольованих сегментів у локальній бездротовій мережі включає всі рівні захисних заходів – фізичні, логічні та організаційні (рис. 1).

Рис. 1. Схема формування КЗ у БКМ

Також важливою ланкою системи захисту будь-якої локальної мережі є обізнаність персоналу, який буде користуватися даною мережею. Впровадження організаційних заходів теж є складовою стратегії побудови КЗ.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Було проаналізовано існуючі методи формування КЗ у БКМ, їх переваги та недоліки. Було відмічено, що класичні фізичні та програмні методи зонування мають певні обмеження в гнучкості, зміні зони покриття та введення нових систем кібербезпеки. Використання VLAN, WIDS-моніторингу та новітніх протоколів безпеки дозволяє формувати адаптивні КЗ, але для впровадження кожного методу є певні складноші. Запропонована схема формування КЗ комбінованого підходу, який включає різні методи в тому числі й організаційні заходи. Подальші дослідження полягають у розробці нових методів формування КЗ, а також у автоматизації систем динамічного управління КЗ. Важливою ланкою майбутніх перспектив є використання штучного інтелекту для забезпечення безпеки та моніторингу мережевих ресурсів. Доцільно дослідити технології SDN/NFV та методи їх інтеграції у структуру БКМ.

Список бібліографічного опису

1.Huang B., Yao H., Wu Q. B. Prediction and evaluation of wireless network data transmission security risk based on machine learning. *Wireless Networks*. 2024. DOI: 10.1007/s11276-024-03773-7.

2.Zhang X. et al. Scalable Power Control/Beamforming in Heterogeneous Wireless Networks with Graph Neural Networks / GLOBECOM 2021 – 2021 IEEE Global Communications Conference, Madrid, Spain, 7–11 December 2021. 2021. DOI: 10.1109/globecom46510.2021.9685457.

3.Зінченко О. В., Вишнівський В. В., Гладких В. М., Прокопов С. В., Звенігородський О. С. Аналітичне моделювання SDN / NFV. *Системи управління, навігації та зв'язку* : зб. наук. праць. 2021. Т. 2, № 64. С. 136–139. DOI: 10.26906/SUNZ.2021.2.136.

4.Zhu C. et al. ADFL: Defending backdoor attacks in federated learning via adversarial distillation. *Computers & Security*. 2023. Vol. 132. P. 103366. DOI: 10.1016/j.cose.2023.103366.

5.Guri M., Zadov B., Elovici Y. ODINI: Escaping Sensitive Data From Faraday-Caged, Air-Gapped Computers via Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2020. Vol. 15. P. 1190–1203. DOI: 10.1109/tifs.2019.2938404.

6.Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*. 2019. Vol. 1, no. 5. P. 1640–1671. DOI: 10.1039/c9na00108e.

7.MikroTik hAP (RB951Ui-2nD). Mikrotik.UA. URL: https://www.technotrade.com.ua/Products/MikroTik_RB951Ui-2nD.php (дата звернення: 27.04.2025).

8.WPA and WPA2 4-Way Handshake. URL: https://networklessons.com/wireless/wpa-and-wpa2-4-way-handshake (last accessed: 27.04.2025).
9 Arikumar K. S., Kumar D., Prathiba S. B., Tamilarasi K., et al. Enhancing the Security of WPA2/PSK Authentication Protocol in Wi-Fi Networks. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 215. P. 413–421. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.043.
10. Noh J., Kim J., Cho S. Secure Authentication and Four-Way Handshake Scheme for Protected Individual Communication in Public Wi-Fi Networks. *IEEE Access*. 2018. P. 1–10. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2809614.
11. Опірський І., Максимів Н., Жежнич М. Дослідження безпеки стандарту Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3). *Український Науковий Журнал Інформаційної Безпеки*. 2023. Т. 29, № 1. С. 21–31. DOI: 10.18372/2225-5036.29.17519.
12. Zanna P., Radcliffe P., Kumar D. WP4: A P4 Programmable IEEE 802.11 Data Plane. 2020 30th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Melbourne, VIC, Australia, 25–27 November 2020. 2020. DOI: 10.1109/itnac50341.2020.9315141.
13. Bennet K. et al. Implementing AI Bill of Materials (AI BOM) with SPDX 3.0: A Comprehensive Guide to Creating AI and Dataset Bill of Materials. The Linux Foundation. 2024. DOI: doi.org/10.70828/rned4427.
14. Chernyshev M., Baig Z., Doss R. R. M. Towards Large Language Model (LLM) Forensics Using LLM-based Invocation Log Analysis. *CCS '24: ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. Salt Lake City UT USA. New York, NY, USA, 2023. P. 89–96. DOI: 10.1145/3689217.3690615.
15. Hsu F.-H., Wu M.-H., Hwang Y.-L., Lee C.-H., Wang C.-S., Chang T.-C. WPTD: Active User-Side Detection of Evil Twins. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Is. 8088 P. 1–14. DOI: 10.3390/app12168088.
16. Kozolkov R., Kutsak S. Received-Signal-Strength-Based Approach for Detection and 2D Indoor Localization of Evil Twin Rogue Access Point in 802.11. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11. P. 13–20. DOI: 10.18280/ijsse.110102.
17. Kara I. Twin Ghosts: Evil Twin Attacks in Wireless Networks and Defense Mechanisms. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. DOI: 10.17678/beuscitech.1450756.

References

1.Huang B., Yao H., Wu Q. B. Prediction and evaluation of wireless network data transmission security risk based on machine learning. *Wireless Networks*. 2024. DOI: 10.1007/s11276-024-03773-7.
2 Scalable Power Control/Beamforming in Heterogeneous Wireless Networks with Graph Neural Networks / X. Zhang et al. GLOBECOM 2021 - 2021 IEEE Global Communications Conference, Madrid, Spain, 7–11 December 2021. 2021. DOI: 10.1109/globecom46510.2021.9685457.
3 Zinchenko O. V., Vyshnivsky V. V., Hladkykh V. M., Prokopov S. V., Zvenihorodsky O. S. Analytical Modeling of SDN / NFV. *Control, Navigation and Communication Systems* : Collection of Scientific Papers. 2021. Vol. 2, No. 64. P. 136–139. DOI: 10.26906/SUNZ.2021.2.136 [in Ukrainian].
4 Zhu C. et al. ADFL: Defending backdoor attacks in federated learning via adversarial distillation. *Computers & Security*. 2023. Vol. 132. P. 103366. DOI: 10.1016/j.cose.2023.103366.
5.Guri M., Zadov B., Elovici Y. ODINI: Escaping Sensitive Data From Faraday-Caged, Air-Gapped Computers via Magnetic Fields. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2020. Vol. 15. P. 1190–1203. DOI: 10.1109/tifs.2019.2938010 (last accessed: 26.04.2025).
6 Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*. 2019. Vol. 1, No. 5. P. 1640–1671. DOI: 10.1039/c9na00108e.
7.МікроТік hAP (RB951Ui-2nD). Мікротік ІА. URL: https://www.technotrade.com.ua/Products/MikroTik_RB951Ui-2nD.php (last accessed: 27.04.2025) [in Ukrainian].
8 WPA and WPA2 4-Way Handshake. URL: https://networklessons.com/wireless/wpa-and-wpa2-4-way-handshake (last accessed: 27.04.2025).
9 Arikumar K. S., Kumar D., Prathiba S. B., Tamilarasi K., et al. Enhancing the Security of WPA2/PSK Authentication Protocol in Wi-Fi Networks. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 215. P. 413–421. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.043.
10. Noh J., Kim J., Cho S. Secure Authentication and Four-Way Handshake Scheme for Protected Individual Communication in Public Wi-Fi Networks. *IEEE Access*. 2018. P. 1–10. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2809614.
11. Opirskyi I., Maksymiv N., Zhenchur M. Security research of Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3). *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2023. T. 29, № 1. C. 21–31. DOI: 10.18372/2225-5036.29.17519 [in Ukrainian].
12. Zanna P., Radcliffe P., Kumar D. WP4: A P4 Programmable IEEE 802.11 Data Plane. 2020 30th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Melbourne, VIC, Australia, 25–27 November 2020. 2020. DOI: 10.1109/itnac50341.2020.9315141.
13. Bennet K. et al. Implementing AI Bill of Materials (AI BOM) with SPDX 3.0: A Comprehensive Guide to Creating AI and Dataset Bill of Materials. The Linux Foundation. 2024. DOI: 10.70828/rned4427.
14. Chernyshev M., Baig Z., Doss R. R. M. Towards Large Language Model (LLM) Forensics Using LLM-based Invocation Log Analysis. *CCS '24: ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. Salt Lake City UT USA. New York, NY, USA, 2023. P. 89–96. DOI: 10.1145/3689217.3690615.
15. Hsu F.-H., Wu M.-H., Hwang Y.-L., Lee C.-H., Wang C.-S., Chang T.-C. WPTD: Active User-Side Detection of Evil Twins. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Is. 8088 P. 1–14. DOI: 10.3390/app12168088.
16. Kozolkov R., Kutsak S. Received-Signal-Strength-Based Approach for Detection and 2D Indoor Localization of Evil Twin Rogue Access Point in 802.11. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2021. Vol. 11. P. 13–20. DOI: 10.18280/ijsse.110102.
17. Kara I. Twin Ghosts: Evil Twin Attacks in Wireless Networks and Defense Mechanisms. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. DOI: 10.17678/beuscitech.1450756.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-31
УДК: 004.75
Міхевич Оксана Іванівна, ст. викладач
https://orcid.org/0000-0002-3009-2391
Шульгач Іван Сергійович, студент
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РОЗРОБКИ ВЕБ-ІНТЕРФЕЙСУ КЕРУВАННЯ АПАРАТНИМИ МОДУЛЯМИ ARDUINO В СКЛАДІ СИСТЕМИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Міхевич О. І., Шульгач І. С. Методи та засоби розробки веб-інтерфейсу керування апаратними модулями Arduino в складі системи інтернету речей. Активне поширення технологій Інтернету речей і широке використання у численних галузях, від домашньої автоматизації до промислового моніторингу, створюють потребу у розробці зручних та функціональних засобів взаємодії з такими системами. Ключовим елементом, що забезпечує зручний моніторинг, збір даних та дистанційне керування пристроями, є веб-інтерфейс. У даній статті здійснено аналіз сучасних методів та інструментальних засобів, призначених для розробки веб-інтерфейсів, орієнтованих на керування апаратними модулями Arduino у рамках систем Інтернету речей. Досліджено ролі архітектурних стилів проектування, включаючи набір оптимальних ефективних протоколів обміну та визначено стек технологій для фронтенд і бекенд розробки. Особливу увагу приділено інтеграції веб-інтерфейсів з мікроконтролерами Arduino, аналізу існуючих бібліотек, програмних платформ та підходів до забезпечення безпеки передачі даних. У статті також викладено основні труднощі та запропоновано рекомендації щодо вибору інструментарію для створення масштабованих веб-рішень для проектів на базі Arduino.

Ключові слова: веб-інтерфейс, Інтернет речей, Arduino, IoT, керування апаратними модулями, методи розробки, засоби розробки, протоколи обміну, архітектура програмного забезпечення, мікроконтролери.

Mikhevych O., Shulhach I., Methods and tools for developing a web interface to control hardware modules of Arduino within an Internet of things system. The active proliferation of Internet of Things (IoT) technologies and the widespread use of Arduino-based hardware modules across numerous domains—from home automation to industrial solutions—have created an urgent need for developing intuitive and functional means of interacting with such systems. A web interface is the key component that provides convenient monitoring, data collection, and remote control of IoT devices. In this article, we present a comprehensive analysis of modern methods and toolsets designed for developing web interfaces aimed at controlling Arduino hardware modules within IoT systems. We examine in detail the design stages, including the selection of optimal architectural patterns, efficient communication protocols (such as HTTP, MQTT, and WebSockets), and up-to-date technology stacks for frontend development (e.g., React, Vue, Angular) and backend development (Node.js, Python/Flask/Django). Special attention is paid to the specifics of integrating web interfaces with Arduino microcontrollers, the analysis of popular libraries and software platforms (for example, Arduino IoT Cloud and Blynk), and approaches to ensuring secure data transmission. The article also highlights the main challenges and offers recommendations for choosing tools to create scalable and reliable web solutions for Arduino-compatible IoT projects.

Keywords: web interface, Internet of Things, Arduino, IoT, hardware module control, development methods, development tools, communication protocols, software architecture, microcontrollers.

Постановка проблеми.

Сучасний розвиток Інтернету речей сприяє масовому використанню апаратних модулів на базі Arduino в різних сферах, від домашньої автоматизації до промислового моніторингу. Водночас існуючі веб-інтерфейси для керування такими системами, зазвичай, обмежуються відображенням базових показників або простим дистанційним увімкненням та вимкненням пристроїв, ігноруючи потреби масштабованості, адаптивності та безпеки. Через обмежені ресурси мікроконтролерів Arduino та різноманіття апаратних модулів виникає необхідність у виборі оптимальних архітектурних рішень і комунікаційних протоколів, що забезпечують мінімальні затримки, надійність передачі даних та можливість легкої інтеграції нових пристроїв. Окремою проблемою є забезпечення зручного користувацького досвіду на фронтенді, сучасні фреймворки потребують адаптивних рішень для відображення даних та керування модулями, а бекенд-інструменти мають поєднувати гнучкість з високим рівнем безпеки. Також чинною, науковою проблемою полягає у розробці методів і засобів, що дозволяють створювати масштабовані, безпечні та інтуїтивно зрозумілі веб-інтерфейси для ефективного керування апаратними модулями Arduino в складі IoT систем. Це рішення відкриє можливості для універсальних платформ керування в різноманітних прикладних галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Активне поширення технологій Інтернету речей (IoT) та широке застосування апаратних модулів на платформі Arduino зумовлюють зростаючий інтерес до розробки зручних та функціональних веб-інтерфейсів керування такими

системами. Останні дослідження в цій галузі спрямовані на вирішення проблем масштабованості, безпеки та інтуїтивності взаємодії з IoT-пристроями на базі Arduino.

Так, у роботі [1] Соколової Н.О. та Белова А.С. розглядається розробка програмного забезпечення IoT-системи на апаратній платформі Arduino для моніторингу параметрів мікроклімату, таких як температура, вологість, рівень CO_2 та освітленість. Дослідження демонструє практичне застосування платформи Arduino, сервісу ThingsSpeak для агрегації, візуалізації та аналізу даних у хмарі, а також використання Telegram-бота як інтерфейсної частини для взаємодії з користувачем. Це підкреслює важливість мережевої взаємодії та доступних інтерфейсів для ефективного збору даних та сповіщення в IoT-системах.

У свою чергу, магістерська дисертація [2] Півня Н.О. присвячена створенню системи охоронної сигналізації офісного приміщення на базі Arduino UNO. Система використовує різноманітні датчики та забезпечує моніторинг і захист у режимі реального часу з можливістю відстеження інформації через веб-інтерфейс. Важливим аспектом є передача даних на сервер для зберігання та аналізу, а також інформування власника про порушення через мобільний додаток або повідомлення, зокрема з використанням GSM-модуля. Це дослідження акцентує увагу на питаннях безпеки, інтеграції датчиків та важливості веб-інтерфейсу для контролю та управління IoT-системами.

Дослідження [3] Цирульника С.М. та Моторної Л.В. фокусується на використанні модуля ESP8266 та хмарного сервісу IFTTT для проектного навчання студентів створенню пристроїв Інтернету речей, на прикладі системи "розумний будинок". Робота розкриває особливості підключення та взаємодії модуля ESP8266, використання хмарного IoT-сервісу aRest для доступу до модуля та передачі даних, а також інтеграцію з такими сервісами, як Weather Underground, через IFTTT для автоматизованого керування. Це підкреслює можливості застосування універсальних інструментальних засобів та хмарних платформ для створення гнучких та функціональних веб-орієнтованих систем керування IoT-пристроями, а також важливість формування відповідних компетенцій у майбутніх фахівців, що включають знання методів передачі даних та програмування мережевих додатків.

Проведений аналіз наведених публікацій свідчить про значну активність наукових досліджень у сфері розробки веб-інтерфейсів та програмних рішень, призначених для керування Arduino-сумісними системами Інтернету речей. Однак, багато існуючих робіт часто фокусуються на вирішенні окремих аспектів розробки, таких як моніторинг конкретних параметрів або реалізація простого дистанційного керування через специфічні платформи чи месенджери. Залишаються недостатньо дослідженими комплексні методи та універсальні інструментальні засоби, що дозволяли б створювати масштабовані, захищені та інтуїтивно зрозумілі веб-інтерфейси для ефективного керування широким спектром апаратних модулів Arduino в складі складних IoT-систем.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є систематизація та аналіз сучасних методів та засобів розробки веб-інтерфейсів для керування апаратними модулями Arduino в системах Інтернету речей, а також розробка рекомендацій щодо вибору оптимальних технологічних стеків та архітектурних рішень. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати існуючі підходи до проєктування та реалізації веб-інтерфейсів для IoT-систем на базі Arduino, дослідити особливості застосування різних комунікаційних протоколів для взаємодії веб-інтерфейсу з мікроконтролерами, оцінити переваги та недоліки популярних фронтенд та бекенд-технологій у контексті розробки для Arduino IoT, визначити ключові аспекти забезпечення безпеки та масштабованості веб-інтерфейсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У рамках даного дослідження було проведено аналіз і систематизацію методів і засобів, спрямованих на розробку ефективного веб-інтерфейсу для керування апаратними модулями Arduino в системах Інтернету речей. Робота зосереджена на знаходженні оптимальних архітектурних рішень, протоколів зв'язку та технологічних стеків, що враховують як специфіку сучасних веб-технологій, так і обмеження платформи Arduino.

Вибір архітектури впливає на її гнучкість, масштабованість, продуктивність. Для систем на базі Arduino, в ході дослідження було проаналізовано три фундаментальні архітектурні моделі, їх узагальнену взаємодію компонентів, які представлено на рисунку 1.

Найпростіший варіант, де веб-сервер реалізується на мікроконтролері з підтримкою мережевих функцій називається архітектура прямої взаємодії. Такий підхід є доцільним для невеликих локальних мереж та завдань з мінімальними вимогами до обчислювальних ресурсів. Перевагами є низька початкова вартість та простота розгортання. Однак, обмежені ресурси

мікроконтролера та підвищені ризики безпеки стають суттєвими недоліками при масштабуванні системи або підключенні до глобальної мережі.

Архітектура взаємодії через хмарну платформу враховує використання проміжних хмарних сервісів, таких як Arduino IoT Cloud, Blynk, AWS IoT, Google Cloud IoT Core. Пристрій на базі arduino надсилає дані на хмарну платформу, а веб-інтерфейс користувача взаємодіє з цією платформою через наданий API. Такий підхід дозволяє значно розвантажити мікроконтролер, забезпечити надійне зберігання даних, реалізувати складну бізнес-логіку на стороні хмари та спростити доступ до пристроїв. Це гарантує високу масштабованість та надійність такого рішення. Разом з тим є потенційний недолік у вигляді залежності від стороннього сервісу та можливих пов'язаних витрат.

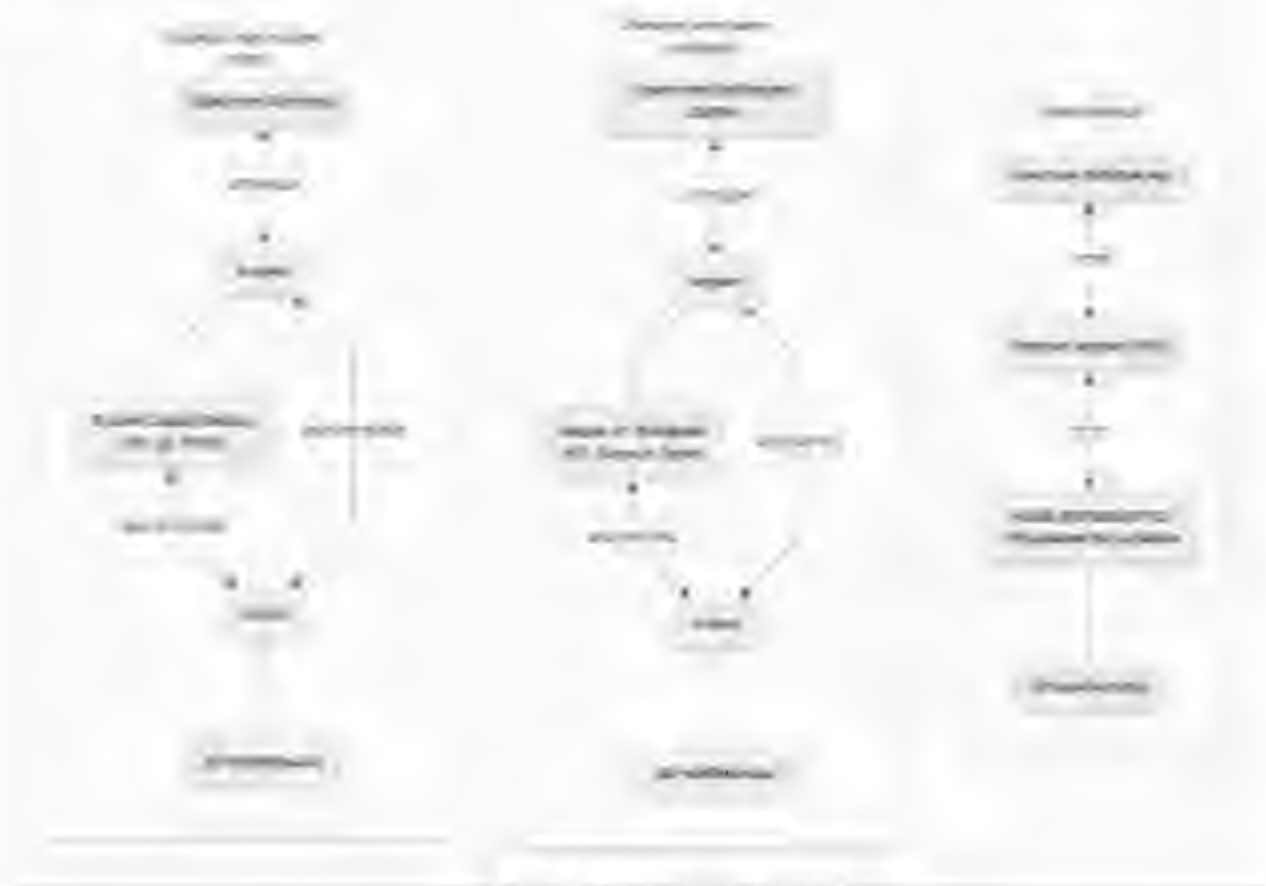


Рис. 1– Архітектурні моделі

Архітектура взаємодії через власний сервер. Цей підхід, що передбачає розробку власного серверного додатку, який виступає посередником між Arduino та клієнтським веб-інтерфейсом. Дослідження показало, що дана архітектура забезпечує максимальну гнучкість у виборі технологій, кастомізації функціоналу та контролі над даними і безпекою. Однак, це вимагає значно більших зусиль на розробку, розгортання та подальшу підтримку серверної інфраструктури.

На основі аналізу цих архітектури було зроблено висновок, що вибір конкретної моделі має грунтуватися на специфічних вимогах проєкту, що видно на таблиці 1.

Важливим є ефективність обміну даними між модулями Arduino та веб-інтерфейсом. Основні протоколи зв'язку, що застосовуються в IoT-системах HTTP, як традиційний протокол для веб-комунікацій, був розглянутий для сценаріїв, де Arduino може виступати як HTTP-клієнт, для відправки даних на сервер, або як HTTP-сервер для прямої взаємодії Використання HTTP визнано обов'язковим для забезпечення захищеної передачі даних. Однак, для IoT-застосунків виявлено недолік у вигляді відносно великого розміру заголовків, що може бути критичним для пристроїв з обмеженою пропускною здатністю.

Таблиця 1 – Аналіз взаємодій

Критерій	Пряма взаємодія	Взаємодія через хмарну платформу	Взаємодія через власний сервер
Основний принцип реалізації	Веб-сервер на мікроконтролері	Використання проміжних хмарних сервісів	Розробка власного серверного додатку
Переваги	Низька вартість, простота розгортання.	Дозволяє розвантажити мікроконтролер, забезпечити зберігання даних, реалізувати складну логіку; висока масштабованість та надійність.	Забезпечує максимальну гнучкість.
Недоліки	Обмежені ресурси мікроконтролера та питання безпеки.	Може бути залежність від стороннього сервісу.	Вимагає більших зусиль на розробку та підтримку.
Доцільність застосування	Для локальних мереж та простих завдань	Для систем, що потребують розвантаження мікроконтролера, зберігання даних, реалізації складної логіки, високої масштабованості та надійності.	Для складніших систем, де потрібна максимальна гнучкість

MQTT, легкий протокол обміну повідомленнями за моделлю «видавець-підписник». Встановлено, що MQTT є високоефективним в умовах нестабільного зв'язку та для пристроїв з обмеженими ресурсами, завдяки малим заголовкам та низькому енергоспоживанню. Роль MQTT-брокера як посередника забезпечує гнучкість у маршрутизації повідомлень.

Протокол WebSockets є оптимальним для завдань, що вимагають повнодуплексного зв'язку та оновлення даних на веб-інтерфейсі в реальному часі без необхідності постійних HTTP-запитів. Це забезпечує низьку затримку та ефективне використання ресурсів.

CoAP, спеціально розроблений для пристроїв з обмеженими ресурсами та мереж з низькою пропускною здатністю. Його схожість з HTTP та оптимізація для низького енергоспоживання роблять його перспективним для певних IoT-застосунків.

Обґрунтування вибору конкретного протоколу залежить від специфічних вимог проєкту до швидкості передачі даних, надійності, енергоефективності, складності реалізації та існуючої інфраструктури. Схему, що ілюструє типові потоки даних при використанні різних протоколів, наведено на рисунку 2.

Рис. 2 – Потоки даних при використанні різних протоколів

Фронтенд частина веб-інтерфейсу відповідає за візуальне представлення даних, що надходять від модулів Arduino, та забезпечення інтерактивної взаємодії з користувачем. Базові веб-технології а саме HTML, CSS, JavaScript є основою будь-якого веб-інтерфейсу і можуть бути достатніми для простих завдань візуалізації та управління.

Сучасні JavaScript-фреймворки React, Angular, Vue.js чудово підходять для створення складних, динамічних та інтерактивних односторінкових додатків. Вони надають структурований підхід до розробки, компоненту модель, управління станом та інші інструменти, що прискорюють розробку та покращують якість коду.

Використання готових UI-компонентів таких, як Bootstrap, Materialize, Tailwind CSS та значно прискорює процес розробки візуальної частини інтерфейсу та забезпечує його адаптивність для різних пристроїв.

У випадках, коли обрано архітектуру з власним сервером, бекенд виконує ключові функції обробку запитів від фронтенду, взаємодію з базою даних для зберігання та отримання даних телеметрії, а також комунікацію з апаратними модулями Arduino. Node.js має високу ефективність для IoT-застосунків завдяки його асинхронній неблокуючій моделі вводу-виводу, що добре підходить для обробки великої кількості одночасних підключень від пристроїв та користувачів.

Python є популярним вибором завдяки своїй простоті, швидкості розробки та великій кількості бібліотек, зокрема для аналізу даних та машинного навчання, що може бути корисним для обробки даних з IoT-пристроїв.

Java, потужна та надійна платформа, що підходить для розробки великих, високопродуктивних та масштабованих корпоративних систем, в тому числі й IoT-платформ.

PHP популярна технологія для веб-розробки, що також може бути використана для створення бекенду IoT-систем.

Вибір конкретної бекенд-технології, як показало дослідження, залежить від таких факторів, як складність проекту, вимоги до продуктивності, навантаження, досвід команди розробників та наявність необхідних бібліотек.

Безпека та масштабованість є критично важливими аспектами при розробці веб-інтерфейсів для IoT-систем. Шифрування каналів зв'язку є необхідність використання HTTPS, TLS, SSL для захисту даних, що передаються між веб-інтерфейсом, сервером та пристроями. Для автентифікації та авторизації є різні механізми, наприклад, токени JWT, OAuth 2.0, для надійної перевірки ідентичності користувачів та пристроїв, а також для розмежування прав доступу до функцій системи та даних.

Проведене дослідження методів та засобів розробки веб-інтерфейсів для керування апаратними модулями Arduino дозволило систематизувати ключові підходи та технології, що застосовуються на різних етапах життєвого циклу таких систем. На основі аналізу було виявлено, що вибір конкретних технологій, архітектурних рішень та протоколів зв'язку не є універсальним і значною мірою детермінується специфікою конкретного IoT-проекту. До таких визначальних факторів належать кількість пристроїв та користувачів, вимоги до рівня безпеки та конфіденційності даних, доступний бюджет, необхідна функціональність веб-інтерфейсу, а також наявний досвід та компетенції команди розробників.

Для реалізації простих локальних завдань, таких як керування кількома датчиками або виконавчими пристроями в межах домашньої мережі, цілком достатнім може бути застосування архітектури прямої взаємодії з реалізацією веб-сервера безпосередньо на мікроконтролерах типу ESP8266 або ESP32. Це мінімізує витрати та складність розгортання.

Для більш складних, розподілених або комерційних систем, де важливі надійність, масштабованість та розширений функціонал, дослідження обґрунтовує доцільність використання архітектур з проміжним сервером. У таких випадках протоколи MQTT та WebSockets продемонстрували свою ефективність для забезпечення надійного та швидкого обміну даними в реальному часі, що є критичним для багатьох IoT-застосунків.

Застосування сучасних JavaScript-фреймворків для розробки фронтенду, згідно з результатами, дозволяє створювати інтерактивні, адаптивні та функціонально наповнені користувацькі інтерфейси. Вибір потужних бекенд-платформ забезпечує необхідну продуктивність та гнучкість серверної частини.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У ході дослідження проведено аналіз сучасних методів та інструментів для розробки веб-інтерфейсів керування модулями Arduino в IoT-системах. Розглянуто архітектурні підходи, протоколи зв'язку, технології розробки та аспекти

безпеки. Вибір стеку технологій залежить від складності завдання, кількості пристроїв, вимог до продуктивності, безпеки та бюджету. Для простих систем доцільні вбудовані веб-сервери; для складних – архітектури з проміжним сервером. Протоколи MQTT та WebSockets ефективні для комунікації в реальному часі. Сучасні JavaScript-фреймворки та серверні платформи надають потужні інструменти розробки.

Список бібліографічного опису

1. Соколова Н.О., Бєлов А.С. Розробка програмного забезпечення IoT-системи на апаратній платформі Arduino. URL: https://surl.li/edglue (дата звернення: 13.05.2025).
2. Півень Н.О. Система охоронної сигналізації офісного приміщення. URL: https://surl.li/rhxyeg (дата звернення: 13.05.2025).
3. Шульгинь С. М. Вплив особистісних та професійних рис на ефективність діяльності менеджера. URL: https://surl.lt/wlfjye (дата звернення: 13.05.2025).

References

1. Sokolova N.O., Bielov A.S. Rozrobka prohrammoho zabezpechennia IoT-systemy na aparatnii platformi arduino [Development of IoT system software on the Arduino hardware platform]. URL: https://surl.li/edglue (accessed: May 13, 2025).
2. Piven N.O. Systema okhoronnoi syhnalizatsii ofisnoho prymishchennia [Office security alarm system]. URL: https://surl.li/rhxyeg (accessed: May 13, 2025).
3. Tsymbalyk S. M. Vplyv osobystisnykh ta profesiinykh rys na efektyvnist diialnosti menedzhera [The influence of personal and professional traits on the effectiveness of a manager's activity]. URL: https://surl.lt/wlfjye (accessed: May 13, 2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-32
УДК 004.415.3
Pekh Petro, PhD
https://orcid.org/0000-0002-6337-3319
Yankovsky Bohdan, bachelor
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

FEATURES OF CREATING WEB APPLICATIONS USING THE PLATFORM C# ASP .NET CORE MVC

Pekh P., Yankovsky B. Features of creating web applications using C# ASP .NET CORE MVC. The article discusses the features of using the ASP.NET Core MVC platform on the example of developing a web application in the form of a pharmacy customer information system. The strengths and weaknesses of this platform are analyzed. Pharmacy customers are primarily interested in information about the availability of the necessary drugs, new drug arrivals, current promotional offers and much more. In addition, it is important for the client to be able to obtain the necessary information online and in a short time. And here you cannot do without a reliable, effective and fast web resource. However, in many cases, a web application can be quite simple and limited to providing several functions: user registration, payment processing, report generation. This is due to the fact that most pharmacies are small enterprises with limited financial capabilities. Therefore, it will be beyond the power of such an enterprise to develop and operate its own database. The question immediately arises of how to get around this problem. There, what should be the platform for developing its own information system. In our opinion, a good solution is the ASP.NET Core MVC platform, on the basis of which the web application proposed in the article is developed. If only because it allows you to create a fully functional customer information system without using a database, while at the same time allowing you to store information in JSON file format.

Keywords: C# ASP .NET CORE MVC platform, MVC technology, web application

Пех П. А., Янковський Б. О. Особливості створення веб-застосунків з використанням C# ASP.NET Core MVC. У статті розглянуто особливості використання платформи ASP.NET Core MVC на прикладі розробки веб-додатку у вигляді системи інформування клієнтів аптеки. Проаналізовано сильні та слабкі сторони даної платформи. Клієнтів аптеки в першу чергу цікавить інформація про наявність потрібних ліків, нові надходження ліків, актуальні акційні пропозиції та багато іншого. Крім того, клієнту важливо мати можливість отримати необхідну інформацію онлайн і в короткі терміни. І тут без надійного, ефективного і швидкодіючого веб-ресурсу не обійтися. Однак у багатьох випадках веб-додаток може бути досить простим і обмежуватись забезпеченням кількох функцій: реєстрацією користувачів, обробкою платежів, генеруванням звітів. Це пов'язано з тим, що більшість аптек є невеликими підприємствами з обмеженими фінансовими можливостями. Тож розробляти та експлуатувати власну базу даних такому підприємству буде не по силах. Тому в якому питанні, як обійти цю проблему. Тобто, якою має бути платформа для розробки власної інформаційної системи. На наше переконання, хорошим рішенням є платформа ASP.NET Core MVC, на базі якої розроблений запропонований у статті веб-додаток. Хоча б тому, що дає змогу створювати повнофункціональну систему інформування клієнтів зовсім без використання бази даних, надаючи можливість зберігати інформацію у форматі JSON-файлів.

Ключові слова: платформа C# ASP .NET CORE MVC, технологія MVC, веб-додаток

Problem statement. Automation of customer service processes in pharmacies contributes to improving the quality of service, reducing the burden on staff and informing visitors in a timely manner. In this regard, there is a need to create a modern system that allows informing customers about the availability of medicines, new arrivals, promotions and other important information in an interactive format.

The purpose of the study is to develop a software and hardware information system that allows pharmacy customers to receive information about the availability of medicines, their description and price, and also provides a convenient administrative panel for managing this data, using the modern ASP.NET Core MVC web framework.

The novelty of the study lies in creating a fully functional customer information system that does not use a database, but stores information in JSON file format, which greatly simplifies its deployment on local devices or in small pharmacies without a complex IT infrastructure. In addition, the system has a hidden administrator mode that allows staff to send customers notifications about new arrivals or promotions.

Main part. The system is developed using the ASP.NET Core MVC template, which implements the Model-View-Controller pattern, which allows logical separation of business logic, user interface and request processing. The client part provides viewing of the medicine catalog with an image, description, price and search function. Client registration is performed by name and phone number. The administrative panel implements the functions of adding new medicines, viewing registered clients and informing them about updates.

JSON files are used to store data, which are read and written using .NET tools. This allows you to reduce the complexity of project setup and increase its portability.

A brief description of the web application development technology is given in Table 1.

Table 1 – Web application development technologies and tools

Component	Опис
Programming Language	C# (.NET 9.0)
Platform	ASP.NET Core MVC
Data Storage	JSON-файли (clients.json, medicines.json)
Interface	Razor Pages (.cshtml)
Development Environment	Visual Studio 2022

The project structure is shown in Figure 1, and its elements are described in Table 2.

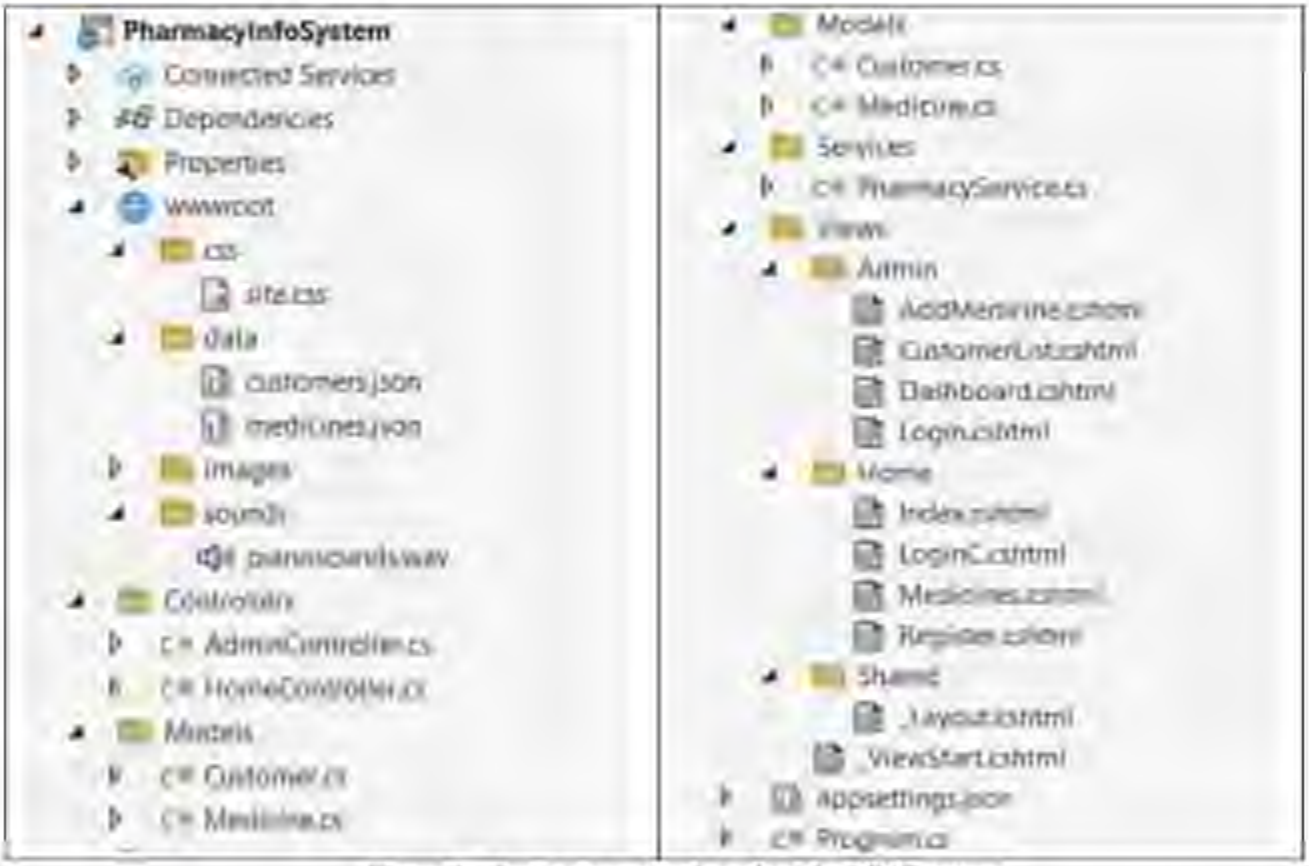


Figure 1 – Project structure based on the MVC pattern

The information system is implemented according to the MVC principles based on three blocks:

– Model: Client, Medicine classes, which describe data (name, phone, name of medicine, price).

– View: Razor pages (.cshtml) for displaying a list of medicines, customer registration form, administrative panel.

– Controller: logic of interaction with the user, routes Home/Index, Home/Client, Home/Admin, Admin/AddMedicine.

Table 2 – Web application elements

Path	Element	Description
/wwwroot	css	CSS style directory. Contains files responsible for the appearance of the site (fonts, colors, padding, etc.)

/wwwroot	data	Directory for storing data in the form of JSON files, medicines.json, and clients.json. Analogue of a database, implemented as local files.
/wwwroot /wwwroot	images sounds	Contains images used on the site Directory for audio files used on the site
/Controllers	AdminController.cs	Controller responsible for the administrator's functionality
/Controllers	HomeController.cs	Main controller for clients. Processes requests to the main page, customer registration, viewing medicines, etc.
/Models	Customer.cs	Model representing the client: name, phone number.
/Models /Services	Medicine.cs PharmacyService.cs	Medicine model: name, description, price, path to the image Class that implements the logic of interaction with JSON files. Reads and stores data about clients and medicines.
/Views /Views/Admin	ViewStart.cshtml AddMedicine.cshtml	File that sets the basic settings for all Razor pages. Page with a form for adding a new medicine in the admin panel.
/Views/Admin /Views/Admin	CustomerList.cshtml Dashboard.cshtml	Page that displays a list of registered clients for the administrator. Administrator main page
/Views/Admin /Views/Home	Login.cshtml Index.cshtml	Administrator login form (login/password) Site main page.
/Views/Home	LoginC.cshtml	Client login form
/Views/Home /Views/Home	Medicines.cshtml Register.cshtml	Page that displays the drug catalog. Includes search, sorting, filtering. New client registration form (name, phone).
/Views/Shared	_Layout.cshtml	General site template. Includes HTML page structure, header, footer, menu, etc.
	appsettings.json	Configuration file
	Program.cs	The main application startup file. Creates a web server, configures routing, adds services, middleware (e.g., static file support, MVC, etc.).

The web application, developed on the basis of the MVC platform (Fig. 2), consists of two parts: administrative and user. It differs in the following.

– for users, the following were implemented: the ability to register and authorize; viewing the list of medications with the ability to search and sort;

– for the administrator, the following were implemented: the ability to authorize; viewing the list of medications; adding new medications; deleting medications; viewing the list of clients;

JSON files were used as an alternative to a database for storing information about medications and clients;

– styles and background images were added to improve the visual design;
– audio accompaniment was implemented in the form of a background melody;
– a header with a logo and a pop-up menu was created for ease of navigation;
a footer with dynamic elements was added.

Figure 2 – Main window of the web application after client authorization

Features of the web application implementation:
- created without using databases: data is stored in JSON files (clients.json, medicines.json);
- client registration: the user enters the name and phone number, the data is stored in clients.json;
- search for medicines: implemented filter by name and sorting by price/availability;
- administrative panel: available at URL /Home/Admin, login and password – admin/admin.

The results of testing the web application are given in Table 3.

Advantages of using ASP.NET Core MVC:
- separation of logic, presentation and data;
- flexible routing configuration;
- built-in support for forms, validation and authorization;
- ability to quickly deploy without additional services.

Table 3 – Results of testing the web application

Function	Status	Comment
Client registration	successful	Data is stored in JSON
Search and view medications	successful	Search works by partial name
Add medications	successful	Added medications are immediately visible to the client
Work without a database	successful	No SQL connection
Client authorization	successful	Previously registered client successfully authenticated
View client list	successful	Administrator can view registered clients

Security and reliability. Although the system does not use a database, it allows you to store data in a secure format. Access to the administrative panel is limited by authorization, which prevents unauthorized editing of information. Additionally, the platform structure allows you to implement data encryption in JSON files, restrict access to certain routes and integrate backup mechanisms.

Practical significance of the development. The proposed system is of practical importance for pharmacies that seek to digitize the customer service process without significant financial investments. Due to the rejection of the server database and the use of JSON files, the system can be quickly configured and implemented even on computers with minimal resources. This makes it attractive for small pharmacies or temporary retail outlets in rural areas where there is no constant Internet connection.
Comparison with alternative solutions. Unlike solutions based on PHP or JavaScript frameworks such as Node.js, the ASP.NET Core MVC system has better integration with Windows tools, support for multi-

level routing, and a convenient access control model. In addition, development in C# allows you to reduce the number of errors due to strict typing and effective work with an object-oriented structure

System development prospects. Thanks to the use of ASP.NET Core MVC, the developed system has a flexible architecture that allows you to easily expand its functionality. In the future, it can be supplemented with integration with third-party API services to check the availability of medicines in other pharmacies, support for push notifications for customers, expansion of the administrative panel with statistical modules, or integration with mobile applications. It is also possible to implement a voice control system or support for a multilingual interface to improve accessibility.

Conclusions.

The work developed a web application for informing pharmacy customers, which has an intuitive interface, implemented on the basis of ASP.NET Core MVC. The system does not require the use of a database and can run on any server with .NET support.

The effectiveness of using the MVC platform for building software and hardware information systems for small enterprises has been demonstrated. In the future, the system can be upgraded by ensuring interaction with the hardware part (for example, LED screens in the pharmacy, smart displays, voice assistants).

References

1 Overview of ASP.NET Core MVC. *Microsoft Learn. Build skills that open doors in your career.* URL: https://learn.microsoft.com/uk-ua/aspnet/core/mvc/overview?view=aspnetcore-9.0 (date of access: 02.05.2025).
2 Freeman A. Pro ASP.NET Core MVC 2. Berkeley, CA : Apress, 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3150-0 (date of access: 02.05.2025).
3 Peleshenko S. Web programming: tutorial. K.: KNU., 2020. 256 p.
4 JSON. JSON. URL: https://www.json.org/json-en.html (date of access: 02.05.2025).
5 Shapovalov O. Technologies for creating web applications in .NET. Lviv: LNU, 2021. 178 p.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-33
УДК 004.4153
Pekh Petro, PhD
https://orcid.org/0000-0002-6327-3319
Yanchar Oleksandr, bachelor
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

FEATURES OF MODERN TECHNOLOGY C# BLAZOR SERVER FOR WEB APPLICATIONS DEVELOPMENT

Pekh P., Yanchar O. Features of modern technology for C# Blazor Server for web applications development. creating web applications using C# BLAZOR SERVER. The article examines the features of using the C# Blazor Server platform along the example of developing a web service for job search. Probably, no one disputes the statement that a convenient and fast web service for job search is equally needed, on the one hand, by those who are looking for a job, and on the other hand, by those who offer this job. Therefore, the development of simple and fast web services of this direction is and will be an urgent task in the future. What is the main difficulty here? In our opinion, this is the optimal choice of the platform by means of which the web service should be created. Based on the fact that to solve the tasks that arise in the process of job search, one cannot do without developing and using databases containing information about both clients and employers, the advantage is on the side of platforms that provide such functionality. C# Blazor Server belongs to such platforms As for the main advantage of the C# Blazor Server platform, the researchers focus on the fact that all the code is executed on the server, and the client only receives updates via SignalR. This allows the client to avoid downloading a large amount of .NET runtime. At the same time, the requirements for the browser are reduced, since the service works even on medium-power devices In addition, the service is quickly started without delays in loading and compiling WebAssembly.
Keywords: C# ASP .NET platform, C# Blazor Server technology, SignalR, WebAssembly, web service

Пех П.А., Янчар О.Р. Особливості сучасної технології C# Blazor Server створення веб-додатків. В статті досліджуються особливості використання платформи C# Blazor Server на прикладі розробки веб-сервісу для пошуку роботи. Мабуть, ні в кого не викликає заперечення твердження, що зручний та швидкий веб-сервіс для пошуку роботи однаково потрібен, з одного боку, тим хто роботу шукає, а з другого боку, тим хто роботу пропонує. Тож розробка простих та швидкодіючих веб-сервісів подібного спрямування є і буде в майбутньому актуальною задачею. В чому тут основна складність? На нашу думку, це оптимальний вибір платформи, засобами якої веб-сервіс має створюватися. Виходячи з того, що для вирішення задач, які виникають у процесі пошуку роботи, не обійтися без розробки і використання баз даних, що містять інформацію, як про клієнтів, так і про роботодавців, перевага на боці платформ, що такий функціонал забезпечують. C# Blazor Server належить саме до таких платформ. Щодо основної переваги платформи C# Blazor Server, то увага дослідників акцентується на тому, що увесь код виконується на сервері, а клієнт лише отримує оновлення через SignalR. Це дозволяє клієнту не завантажувати великий обсяг .NET-рантайму. При цьому знижуються вимоги до браузера, оскільки сервіс працює навіть на середньо- та слабкопотужних пристроях. Крім того, забезпечується швидкий старт сервісу без затримок на завантаження та компіляцію WebAssembly.
Ключові слова: платформа C# ASP .NET, технологія C# Blazor Server, SignalR, WebAssembly, веб-сервіс

Problem statement. The need for a fast and convenient job search remains relevant for many users, as does the need for effective recruitment for employers. Most modern platforms are difficult to use, have high resource requirements, or are financially inaccessible to small businesses.

Given this, there is a need to create an optimized web service that will be simple, accessible, and will work stably even on medium-power devices. One of the effective solutions is to use C# Blazor Server, which allows you to implement interactive functionality with minimal load on the client side.

The purpose of the work is to study the C# Blazor Server platform in the process of developing a web service for job search, which provides convenient and effective interaction between job seekers and employers.

The main functions of the web service should include:
- creating a profile and resume by users;
- searching for vacancies with the ability to apply filters;
- sending feedback on vacancies;
- creation and editing of vacancies by employers.

The novelty of the work lies in the use of Blazor Server technology to develop a web service for searching for jobs without using JavaScript on the client side. This approach allows you to implement all business logic exclusively on the server, which significantly reduces the requirements for the client device and ensures stable operation even on low-power systems.

The key features of the implementation are:

– saving the user interface state on the server, which guarantees data integrity and stability of interaction;

using the SignalR protocol for two-way communication between the client and the server in real time;

– updating the DOM on the client side without completely reloading the page, which improves performance and is convenient for users;

– building a system based on a modern architecture with a clear distribution of functions, which ensures easy scaling and the possibility of further expansion of functionality.

The main part. The web service developed in the work, the structure of which is shown in Figures 1 and 2, is implemented using a three-tier architecture that provides modularity, extensibility and ease of system support:

1. Client layer – built using Razor components that implement interfaces for registration, creating resumes and vacancies. The components provide interactivity and dynamic interaction with the user without completely reloading the pages.

2. Server layer – includes C# classes for processing business logic and a service layer that is responsible for interaction with the database. Communication between the client and the server is carried out via SignalR, which allows updating the interface in real time.

3. Data storage layer – represented by a SQL Server database, the models of which are implemented using Entity Framework Core, which provides convenient object-relational mapping (ORM) and supports data migration.

Additional technologies used in the project. A number of modern technologies were used to implement the functionality of the web service, ensuring scalability, security, speed, and ease of development. Table 1 lists the main components of the system and the corresponding technologies used for their implementation.

Table 1 – Technologies used in the project

Component	Technology used
UI Components	Blazor Server, CSS
ORM	Entity Framework Core – LINQ
Authentication	ASP.NET Core Identity
Communication	SignalR
Database	SQL Server
Configuration Storage	appsettings.json
Security	ASP.NET Middleware

System security. ASP.NET Identity is used to protect data, which provides:

– user registration with identity confirmation (email confirmation).

– authorization according to access roles.

– access restriction to confidential information.

– protection against major web threats, such as CSRF and XSS, through built-in Razor Pages mechanisms and middleware.

Using SignalR for real-time. A feature of Blazor Server is the presence of a built-in SignalR connection, which provides instant page updates when the status changes. For example:

– when a candidate applies for a vacancy, the employer instantly sees a new message in his personal account;

– when the application status changes, the candidate also sees the update without a reboot.

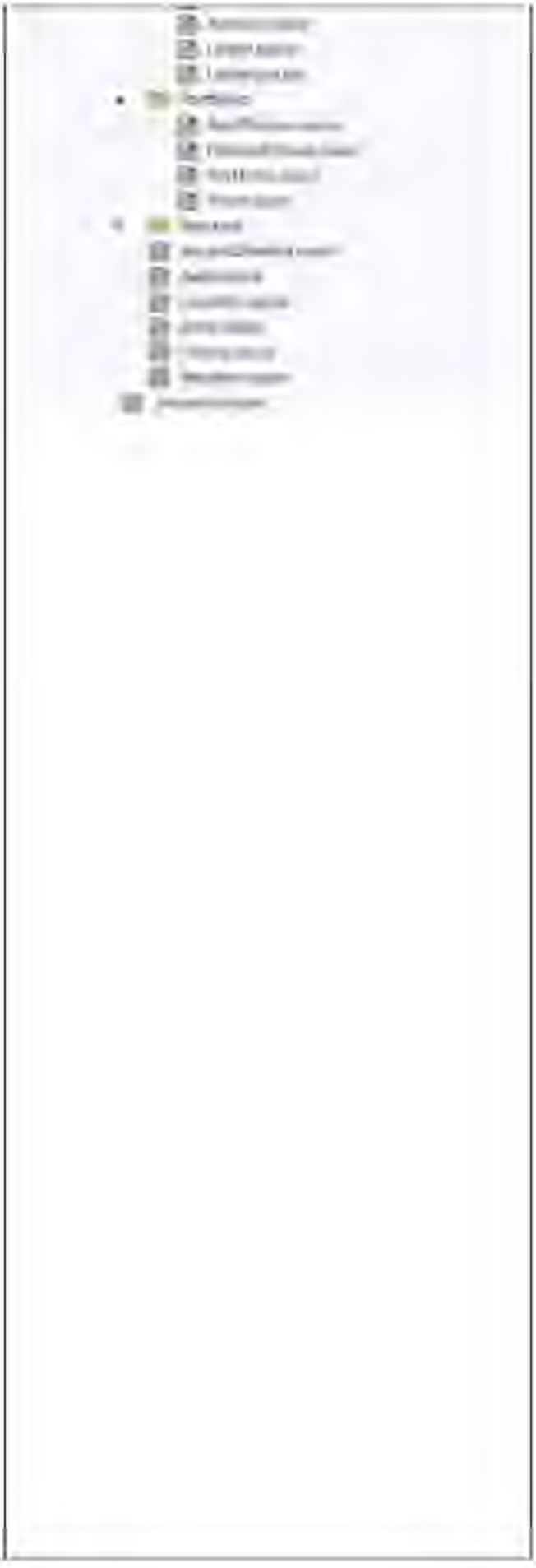


Figure 1 – Web service structure (beginning)

Figure 2 – Web service structure (end)

A generalized diagram of the system architecture and the interaction between its components is shown in Figure 3.

Figure 3 – Architecture of a job search web service

To implement the functionality of the web service, a database structure was developed that reflects key entities and their relationships. The main objects are system users (candidates and employers), resumes, vacancies, and job reviews. The main database entities with a list of key fields are given in Table 2.

Table 2 – Main database entities

Entity	Main fields
Users	Id, UserName, Email, PasswordHash, Role, CreatedAt

Resumes	Id, UserId, FullName, Experience, Skills, Education, CreatedAt
Vacancies	Id, EmployerId, Title, Description, Location, EmploymentType, Salary, CreatedAt
Applications	Id, ResumeId, VacancyId, Status, AppliedAt

Relationships between database entities:

Users – stores information about system users who can be candidates or employers (defined by the Role field).

Resumes are linked to users via the UserId field – each candidate can have one or more resumes.

Vacancies are linked to employers via the EmployerId field – each employer can create multiple vacancies.

Applications display candidate responses to vacancies by linking resumes (ResumeId) to vacancies (VacancyId). Thus, one candidate can apply for many vacancies, and a vacancy can receive many responses.

Main system functionalities:

- user registration and authorization with role differentiation (candidate, employer, administrator);
- viewing, searching and filtering vacancies by keywords, region, type of employment;
- creation and editing of resumes by users;
- creation, editing and publishing of vacancies by employers;
- platform administration (content moderation, user management)

User interface implementation. To provide a convenient and intuitive user interface, a set of Razor components was created that implement sections for candidates and employers. The main emphasis is on adaptability and dynamic content update without page reloading. Components are reused and interact through events (EventCallback) and state services.

Communication with the server is carried out through DI services that use HttpClient or directly call repository methods in Blazor Server. Figure 4 shows a fully functional registration page interface.

Figure 4 – Registration page interface

Scalability and hosting. To ensure scalability, Azure SignalR Service was used, which allows processing a large number of simultaneous connections. Redis Backplane is also used, which allows the system to scale horizontally in a clustered environment (Azure, Docker, Kubernetes).

The service is deployed on Azure App Service, using Azure SQL as the main database. Continuous integration and delivery (CI/CD) are implemented using GitHub Actions. Configuration parameters are stored in the appsettings.json file, and sensitive data is stored in Azure Key Vault.

Conclusions.

The developed web service for job search showed the effectiveness of the approach with the execution of business logic on the server and updating the interface via SignalR. This ensures stable operation even on weak devices and a quick start without delays. The use of a three-tier architecture, Entity Framework Core, ASP.NET Identity, and scalable Azure services ensures security, convenience, and the ability to expand and improve the web service.

References

1. ASP.NET Core Blazor. Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/blazor/?view=aspnetcore-9.0 (access date: 07.05.2025).
2. Overview of ASP.NET Core SignalR. Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/signalr/introduction?view=aspnetcore-9.0 (access date: 07.05.2025).
3. Azure SignalR Service documentation. Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-signalr/ (access date: 07.05.2025).
4. Himschoot P. Blazor Revealed: Building Web Applications in .NET. Apress, 2019. 272 p.
5. ASP.NET Core Blazor authentication and authorization. Microsoft Learn: Build skills that open doors in your career. URL: https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/core/blazor/security/?view=aspnetcore-9.0&tmp-tabs-visual-studio (access date: 07.05.2025).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-34
UDC 681.3
Stefanyshyn Ivan, Postgraduate Student
https://orcid.org/0009-0008-6930-528X
Pastukh Oleh, Dr. Sc. Prof.
https://orcid.org/0000-0002-0080-7053
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

HIGH-PERFORMANCE COMPUTING FOR MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BRAIN-COMPUTER INTERFACES WITH BIG DATA

Stefanyshyn I., Pastukh O. High-Performance Computing for Machine Learning and Artificial Intelligence in Brain-Computer Interfaces with Big Data. The article explores approaches to optimizing the processing of big data of EEG signals in BCI by combining dimensionality reduction methods and HPC. The relevance of the problem is due to the fact that modern BCIs generate large datasets of signals, the processing of which in real time often creates a critical load on hardware and software resources. The aim of the work is to establish an optimal balance between classification accuracy, model robustness, and data processing time using various dimensionality reduction methods – PCA, ICA, LDA – in combination with the MLP classifier and the Dask library for parallel calculations. A series of experiments was conducted by varying the number of components for each decomposition. It was found that when using PCA with n_components=0.999 or LDA with n_components=13, the accuracy and f1_weighted remain practically the same as in the model without dimensionality reduction, but the processing time is reduced by 1.5-4 times, depending on the settings. The use of fewer components allows for even higher performance, but is accompanied by a noticeable decrease in accuracy, which is critical for neuroengineering and rehabilitation tasks. The use of Dask for organizing parallel calculations made it possible to effectively scale experiments and avoid excessive load on individual system nodes. A comparative analysis of the accuracy, robustness, f1_weighted, roc_auc_ovr_weighted metrics and execution time showed that the optimal settings of matrix layouts allow preserving key information in the signal without significant loss of classification quality. The developed approach has proven its effectiveness for tasks where resource limitations are combined with requirements for stability and accuracy of the system in real-time mode. The practical value of the results lies in the possibility of adapting the proposed pipeline for a wide range of biomedical and engineering applications, where speed, reliability, and robustness of brain signal processing are critical.

Keywords: machine learning, electroencephalogram, motor imagery, high-performance computing, big data, information technologies, brain-computer interfaces

Стефанишин І. М., Пастух О. А. Високопродуктивні обчислення для машинного навчання та штучного інтелекту в інтерфейсах мозок-комп'ютер з великими даними. У статті досліджено підходи до оптимізації обробки великих обсягів EEG даних у BCI шляхом поєднання методів зниження розмірності і високопродуктивних обчислень. Актуальність проблеми обумовлена тим, що сучасні BCI генерують великі масиви сигналів, обробка яких у реальному часі часто створює критичне навантаження на апаратні та програмні ресурси. Метою роботи є встановлення оптимального балансу між точністю класифікації, стійкістю моделей і часом обробки даних за допомогою різних методів зниження розмірності – PCA, ICA, LDA – у комбінації з класифікатором MLP і бібліотекою Dask для паралельних розрахунків. Проведено серію експериментів зі зміною кількості компонентів для кожного розкладу. Встановлено, що при використанні PCA із n_components=0.999 або LDA з n_components=13 точність і f1_weighted залишаються практично такими ж, як у моделі без зниження розмірності, проте час обробки скорочується у 1,5-4 рази залежно від налаштувань. Використання меншої кількості компонентів дозволяє досягти ще більшої швидкості, однак супроводжується помітним зниженням точності, що є критичним для нейроінженерії та реабілітації. Застосування Dask для організації паралельних розрахунків дало змогу ефективно масштабувати експерименти та уникнути надмірного навантаження на окремі вузли системи. Порівняльний аналіз метрик точності, стійкості, f1_weighted, roc_auc_ovr_weighted і часу виконання показав, що оптимальні налаштування матричних розкладів дають змогу зберегти ключову інформацію в сигналі без істотної втрати якості класифікації. Розроблений підхід довів свою ефективність для задач, де обмеженість ресурсів поєднується з вимогами до стійкості й точності роботи системи в режимі реального часу. Практична цінність результатів полягає в можливості адаптації запропонованого пайплайна для широкого спектра біомедичних та інженерних застосувань, де критичними є швидкість, надійність та масштабованість обробки сигналів мозку.

Ключові слова: машинне навчання, електроенцефалограма, рухова уява, високопродуктивні обчислення, великі дані, інформаційні технології, інтерфейси мозок-комп'ютер

Formulation of the problem.

BCIs are a cutting-edge technology that opens up new horizons in human-machine interaction. They are already used in medical fields, neurorehabilitation, mind control of devices, as well as in augmented and virtual reality [1, 16, 21]. Thanks to the ability to read and analyze EEG and other neural signals, these systems help people with disabilities, improve treatments for neurological disorders, and are even used in the eSports field to analyze cognitive processes

However, the work of BCI is associated with serious challenges. One of the main ones is the processing of large volumes of data. Every second of BCI operation generates many signals that need to be analyzed quickly and accurately [2]. However, not all of this data is equally important: some contains critical information, while others can only create an unnecessary load on computing resources. Therefore, the efficiency of BCI operation largely depends on the ability to separate the necessary data from the irrelevant ones, optimizing the process of their processing[3].

The usage of methods for reducing the amount of processed data is an important step in ensuring high speed and accuracy of neural signal recognition. Important signals have priority access to computing power, while less important ones can be filtered or aggregated to reduce the overall load [4]. This approach allows not only to speed up the operation of BCI, but also to reduce power consumption and increase the overall robustness of the system.

In this article, we will consider which data is crucial for the operation of BCI, what factors determine its importance, and how to effectively reduce unnecessary data without losing the accuracy of the system. Analysis of these aspects will allow a better understanding of how to optimize computing processes and improve the performance of modern BCIs.

An analysis of the latest research and publications.

This work is a continuation of our previous research [5-8], in which we investigated the robustness, accuracy, and computational efficiency of various machine learning algorithms for EEG signal classification in BCI systems. Building on the results obtained earlier, this study focuses on the practical implementation of dimensionality reduction techniques and parallel computing tools to further improve the robustness and effectiveness of BCI algorithms when working with large-scale neural datasets. The current analysis develops the proposed methodological framework and provides a more in-depth comparative assessment of dimensionality reduction strategies under different experimental conditions.

Recent advances in data dimensionality reduction and machine learning have led to the development of a variety of methods that improve the accuracy and efficiency of classification models. Dimensionality reduction methods, such as PCA, ICA, and LDA, have become the main steps in data preprocessing in many scientific works, especially in the context of EEG signal classification and motor activity prediction [9-22]. These methods allow for the reduction of the complexity of datasets while preserving important information, which in turn improves the performance of models.

PCA is actively used in research due to its ability to reduce the number of features while preserving as much variation as possible in the dataset. For example, in a study conducted by Djelloul K. and Belkacem A.N. [9], PCA was used to classify EEG signals, which allowed for simplifying the feature space before applying classifiers such as MLP. ICA, on the other hand, is particularly useful for separating independent sources in mixed signals, which is important in neurocomputing tasks. A study by Vélez-Lora I.J. et al. [10] showed how ICA can be used to extract independent components from EEG signals, which significantly improves classification accuracy in motor imagery tasks.

LDA, which provides maximum separation between different classes, is also an important tool in the feature selection process. In the work of Kabir M.H. et al. [11], LDA was applied to select the most discriminative features before using classification algorithms, which ensures high-quality results when further training models.

One of the main directions of modern research is the integration of high-performance computing (HPC) into machine learning. HPC allows for a significant increase in the speed of processing large amounts of data and reduces the time to train models. In the study of Kabir M.H. and colleagues [11], have shown how the use of parallel computing can accelerate the process of feature extraction and classification, which is critical for real-world applications in medicine and neurocomputer interfaces. Optimization techniques, including the use of multithreading and GPU acceleration, are actively used to reduce computational costs, allowing for efficient processing of large data sets.

Optimization of computation is key to processing large data sets and improving model performance, which is especially important for practical applications in areas such as neuroengineering and biomedical signal processing. HPC significantly reduces processing time, which is important for real-world applications of models in living systems.

Therefore, recent studies emphasize the importance of using dimensionality reduction methods such as PCA, ICA, and LDA in combination with HPC to optimize machine learning. These approaches are important for solving complex tasks in the analysis of large data sets, such as EEG signal classification and motor movement prediction.

Formulation of the purpose and objectives of the research.

In previous studies, we performed calculations based on the full set of data obtained from BCIs [5-8]. This approach allowed us to achieve maximum accuracy and robustness, but also created a significant load on computing resources, which could affect the system's processing speed and overall efficiency. Up to now, we have not conducted a systematic analysis of which data are most significant for BCI operations and whether their number can be reduced without significant losses in performance.

This article aims to investigate the possibility of reducing the amount of processed data without significantly affecting the accuracy, robustness, and computation time of BCIs. We propose methods that allow us to reduce the load on the system by discarding less significant data. The selection of relevant information is based on the analysis of its impact on the results of calculations and the efficiency of the algorithms.

In this study, we will perform a comparative analysis of the obtained results, comparing the performance of the BCI algorithms when using the full amount of data with the performance after applying the optimized approach. The performance evaluation will be based on many metrics.

We will also investigate the impact of different filtering parameters on the system performance to determine the optimal settings that will minimize the loss of accuracy while reducing the amount of computation. This will allow us to form clearer conclusions regarding the possibility of using selective data processing in BCIs and offer recommendations for future research in this area.

Presenting the main material.

This study is based on a real-world experiment in which we used the NEUROKOM computer-based electroencephalograph [23] to collect EEG data during the execution of test tasks (Fig. 1). The main goal of the experiment was to obtain accurate and detailed recordings of brain activity, allowing us to better understand which signals are key to BCI operations and which can be filtered out without significant loss of accuracy.

Fig. 1. Photo taken during the experiment

Several EEG data files were collected during the experiment. The following image shows an example of one such file, demonstrating characteristic patterns of brain activity during the test task (Fig. 2).

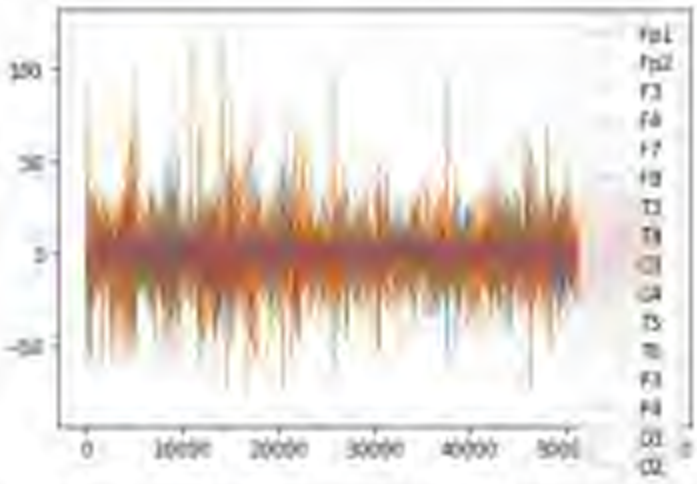


Fig. 2. Illustration of EEG signals during little finger movements

The collected data are extremely large in volume, as the brain generates a significant amount of information every second. Processing such large data sets requires significant computing resources and time. This can create a high load on the BCI, affecting its speed and robustness. That is why one of the key aspects of this research is to identify less significant data that can be filtered out without critical losses in accuracy.

Explanation of investigation.

Our algorithm is based on a classification task, where we use the MLP to analyze the collected EEG data. MLP is an effective choice due to its ability to perform parallel computations, which is especially important for working with large amounts of data, as in our case. The MLP structure allows us to calculate the weights of neurons in different layers simultaneously, using multiple computing cores, which significantly reduces the training time of the model [24].

To optimize the computations and increase the efficiency of working with large data sets, we use the Dask library. It is a powerful tool for parallelizing computations, which allows us to distribute tasks across multiple processors or even a cluster of servers [25]. One of the main advantages of Dask is that it integrates with popular scientific computing libraries such as NumPy, Pandas, and Scikit-learn, making it highly suitable for our current task.

In our experiment, to reduce the amount of data to be processed, we apply dimensionality reduction methods, which allow us to preserve important information while reducing the amount of data that needs to be processed. This is especially important when working with large datasets such as EEG.

One of the main methods we use is PCA. PCA reduces the number of dimensions in the data by identifying principal components that retain the most variability in the data. This allows us to reduce the dimensionality without significantly losing important information. With PCA, we can transform the data into new axes that represent linear combinations of the original features, thus simplifying the calculations [24].

Another important method is ICA, which focuses on finding statistically independent components. ICA is particularly useful in signal analysis, as in the case of EEG, where the signals may be mixed due to noise or artifacts. It allows us to isolate cleaner components that can be useful for classification, reducing the number of features needed [24].

LDA is another method used to reduce dimensionality with a focus on maximizing the separation between classes in the data. LDA allows us to preserve the greatest separation between classes, which makes it useful for classification tasks. This method helps not only reduce the number of features, but also improves classification accuracy by preserving important linear distinctions between classes [24].

The usage of these methods allows us to reduce the amount of data to be processed while preserving the essential information necessary for classification. They allow us to optimize the processing process and reduce the load on the system, which is important for achieving high efficiency and accuracy in processing large data sets.

For each of the dimensionality reduction methods, we will conduct three measurements with different settings for the number of components. The first measurement will be carried out with a large number of

components to preserve as much information from the data as possible. The second measurement involves the use of a small number of components, which will reduce the amount of data and reduce computational complexity, although with some loss of accuracy. The third measurement will include the optimal number of components, which will provide a balance between reducing the size of the data and maintaining sufficient accuracy for subsequent classification.

This approach will make it possible to evaluate how different settings for the number of components affect the accuracy and efficiency of models, and will also help to choose the optimal parameters for each of the methods in the context of a specific problem.

Explaining the calculation pipeline.

In our study, we use a pipeline that includes Scikit-learn, Joblib, Dask clusters, and matrix decomposition methods.

Initially, we used Scikit-learn to build the classification model. The MLP classifier is chosen due to its ability to perform parallel computations, which allows for efficient handling of large datasets. We also apply data reduction methods such as PCA at the data preprocessing stage, which reduces the complexity of the model without losing important information [24-25].

Fig. 3. Software–hardware computer calculation pipeline [25]

After training the model, we use Joblib to serialize it and save it quickly, which avoids retraining.

Dask integrates to distribute the computation across multiple cores or nodes in a cluster, which speeds up the processing of large data sets. In addition, data reduction techniques help reduce the load on the system, allowing Dask to effectively scale the training process [25].

The final stage is the use of clusters for computation, which makes it possible to scale the computation and process large amounts of data without overloading resources.

Such a pipeline allows for fast and efficient data processing, reducing the load on the system thanks to parallel computing and data reduction techniques.

Evaluation of dimensionality reduction methods.

In this section, we will examine the efficiency and performance of code implementations of data reduction techniques, such as PCA, ICA, and LDA. For each of these decompositions, three separate measurements were performed with different component values, which allowed us to evaluate their behavior under varying parameter conditions. The purpose of this analysis is not only to verify the accuracy of the models but also to determine their robustness and the time resources required to perform cross-validation.

Each of the tests includes the application of MLP with a cross-validation function consisting of 10 folds. This approach allows us to obtain 10 accuracy values for each of the tests, which are subsequently used to analyze and compare the results between different data reduction techniques. In addition, an important aspect is to determine the cross-validation computation time for each of the experiments, which helps in assessing the resource efficiency of different methods.

Metrics.

The following metrics are used to evaluate the performance of the models in this study: accuracy, robustness, f1_weighted, roc_auc_ovr_weighted, and computation time. The mathematical equations of these are as follows:

$$accuracy = \frac{TP}{TP + TN + FP + FN}$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$f1\_weighted = 2 * \frac{precision * recall}{precision + recall}$$

$$roc\_auc\_ovr\_weighted = \int_0^1 TPR(t)dFPR(t)$$

where TP = True Positive, TN = True Negative, FP = False Positive, and FN = False Negative, TPR – True Positive Rat, FPR – False Positive Rate [26].

Together, these metrics provide a comprehensive picture of the quality of models, determining not only their accuracy, but also their ability to adapt to different testing conditions, their performance on large data sets, and their ability to correctly classify even in complex situations with class imbalance.

Since metrics are used to evaluate models, they reflect the accuracy, classification ability, and robustness of the model. Representing these metrics as a scalar allows you to reduce the values obtained during cross-validation to a single indicator for each metric, simplifying model comparisons.

This has the advantage over the arithmetic mean, which can be sensitive to extreme values or anomalous samples. The scalar value gives a more stable and generalized assessment of the model, reducing the influence of individual folds that may differ from the general trend. Thus, using a scalar for metrics provides a more objective and accurate assessment of the model's performance.

Evaluation of PCA.

In this test, PCA was used to reduce the dimensionality of the input data. The number of components was selected based on the retained variance, namely 0.98, 0.99, and 0.999. This allowed us to investigate the effect of different degrees of data compression on the performance of the model.

With a variance of 0.98, the number of features was reduced from 16 to 3, 0.99 – 5, and 0.999 – 10. Thus, different amounts of information about the input data were retained, which affected both classification accuracy and model stability. The features obtained after decomposition were used to train the MLP, followed by 10-fold cross-validation, which enabled us to evaluate the classification accuracy for each test.

Figure 4 shows the values of the metrics f1_weighted, accuracy, and roc_auc_ovr_weighted after cross-validation for all model variants, including MLP and various PCA settings.

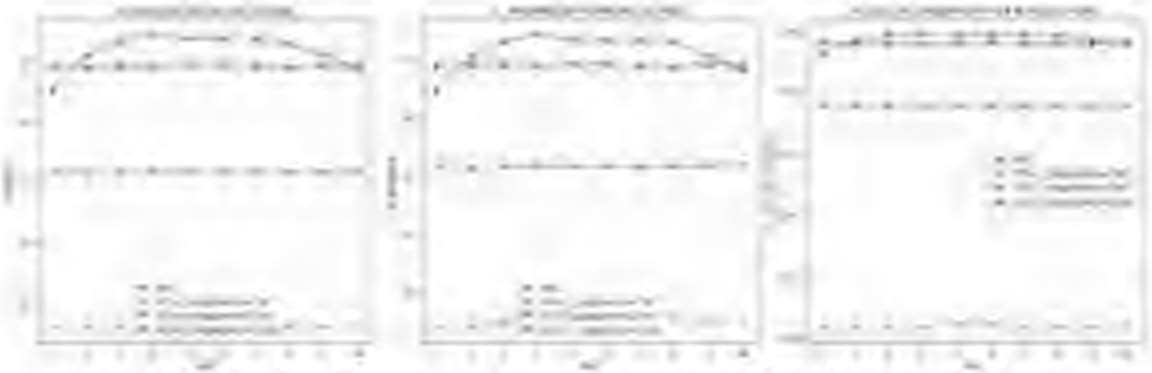


Fig. 4. MLP classification metrics depending on the number of PCA components

Table 1 shows all the final values of the metrics after the calculations, including accuracy, robustness, f1_weighted, roc_auc_ovr_weighted, and the computation time for each option. The data in the table allows us to compare the effectiveness of different approaches and choose the optimal option for a specific problem, taking into account both accuracy and processing time.

Table 1. Metric results for models using PCA

Method	MLP	PCA. n_components=0.98	PCA. n_components=0.99	PCA. n_components=0.999
Accuracy scalar	2.901777	1.459408	2.269285	2.818502
Robustness	0.027762	0.001653	0.001349	0.001464
f1_weighted scalar	2.898321	1.413019	2.264443	2.819112
roc_auc_ovr_weighted scalar	3.154061	2.857855	3.085097	3.150142
Computation time	8679.3	2040.66	2595.61	5937.73

The model without PCA showed the best results in all metrics: accuracy (2.901777), f1_weighted (2.898321), and roc_auc_ovr_weighted (3.154061). This indicates a high ability of the model to correctly classify the data. However, the computation time was the largest among all options – computation time 8679.3 seconds. The robustness of the model accuracy was 0.027762, which is a fairly good indicator of the robustness of the model with different data. When applying PCA with n_components=0.98, which preserves 98% of the variation, the accuracy decreased. The accuracy value became 1.459408, and f1_weighted decreased to 1.413019. Although the roc_auc_ovr_weighted metric decreased to 2.857855, the model remained quite stable, with reduced robustness (0.001653). The computation time was significantly reduced to 2040.66 seconds, making this option suitable when processing time is critical.

By increasing the n_components parameter to 0.99, the accuracy and robustness improved, with accuracy 2.269285 and f1_weighted 2.264443. The roc_auc_ovr_weighted value reached 3.085097. This option showed a good balance between accuracy and computation time, with computation time 2595.61 seconds. Robustness remained high, with 0.001349.

In the variant with n_components=0.999, which preserves 99.9% of the variation, the results became almost identical to the MLP without PCA. The accuracy value reached 2.818502, f1_weighted – 2.819112, and roc_auc_ovr_weighted – 3.150142. The computation time decreased to computation time 5937.73 seconds, which makes this variant the optimal compromise between accuracy, robustness, and computation time.

In general, for tasks where accuracy and robustness are critical, it is best to use PCA with n_components=0.999 or 0.99, as they give results that are close to the MLP without PCA, with reduced computation time. If the main thing is to reduce computation time with some loss of accuracy, then the option with n_components=0.98 may be acceptable, although with a noticeable decrease in results according to the f1_weighted and roc_auc_ovr_weighted metrics.

Evaluation of ICA.

In this section, we will focus on using ICA as a matrix decomposition method. We conducted three separate tests, in which the parameter n_components was assigned values of 3, 8, and 10, where the dimensionality reduction resulted in the corresponding number of classes. After applying ICA to the input data, the resulting components were fed to an MLP, which was trained and evaluated using 10-fold cross-validation.

Figure 5 shows the values of the metrics f1_weighted, accuracy, and roc_auc_ovr_weighted after cross-validation for variants using ICA, where the number of components varies from 3 to 10.

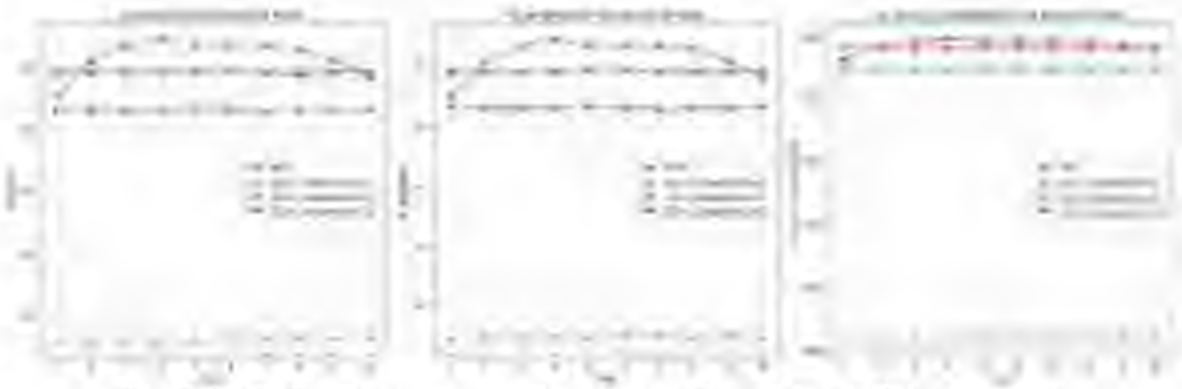


Fig. 5. MLP classification metrics depending on the number of ICA components

Table 2 shows the final values of the metrics after calculations, including accuracy, f1_weighted, roc_auc_ovr_weighted, and computation time for each variant. This data allows us to compare the effectiveness of different ICA variants and choose the most suitable one for a specific task.

Table 2. Metric results for models using ICA

Method	ICA, n_components=3	ICA, n_components=8	ICA, n_components=10
Accuracy scalar	1.459989	2.627146	2.818024
Robustness	0.001395	0.001337	0.001551
f1_weighted scalar	1.414423	2.626093	2.819056
roc_auc_ovr_weighted scalar	2.857514	3.129153	3.15034
Computation time	1922.93	5209.5	5939.67

For the ICA variant with n_components=3, the accuracy decreased significantly, accuracy reached 1.459989, f1_weighted reached 1.414423, and roc_auc_ovr_weighted decreased to 2.857514. Despite the decrease in accuracy, the computation time was significantly shorter – 1922.93 seconds. The robustness in this variant remained at 0.001395, indicating a high sensitivity of the model to changes in the data.

When the number of components was increased to 8, the accuracy improved. Accuracy reached 2.627146, f1_weighted became 2.626093, and roc_auc_ovr_weighted reached 3.129153. The computation time of this variant was consumed_time 5209.5 seconds, which is longer than for n_components=3, but significantly shorter than for MLP without ICA. The robustness remained at a good level of 0.001337.

In the variant where 10 components are stored, the accuracy became the highest among all ICA variants. Accuracy reached 2.818024, f1_weighted was 2.819056, and roc_auc_ovr_weighted was 3.15034. This variant also demonstrated the best robustness, with a value of 0.001551. The computation time of this variant was 5939.67 seconds, which is on par with PCA at n_components=0.999.

Overall, the results show that when using ICA, the number of components significantly affects the accuracy and computation time. If accuracy and robustness are the main metrics, ICA with n_components=10 is the best option, as it gives the best results with moderate computation time. If reducing computation time is a priority, ICA with n_components=3 may be an acceptable option, although with a noticeable decrease in

accuracy. ICA with n_components=8 provides a good balance between accuracy and speed and is a good compromise for most problems.

Evaluation of LDA.

We now turn to the results obtained from using LDA. In the experiments, the parameter n_components was set to 3, 8, and 13, which corresponded to the respective number of features. The resulting data was passed to the MLP model, and classification performance was evaluated using 10-fold cross-validation.

Figure 6 shows the values of the metrics f1_weighted, accuracy, and roc_auc_ovr_weighted after cross-validation for variants using LDA, where the number of components varies from 3 to 13.

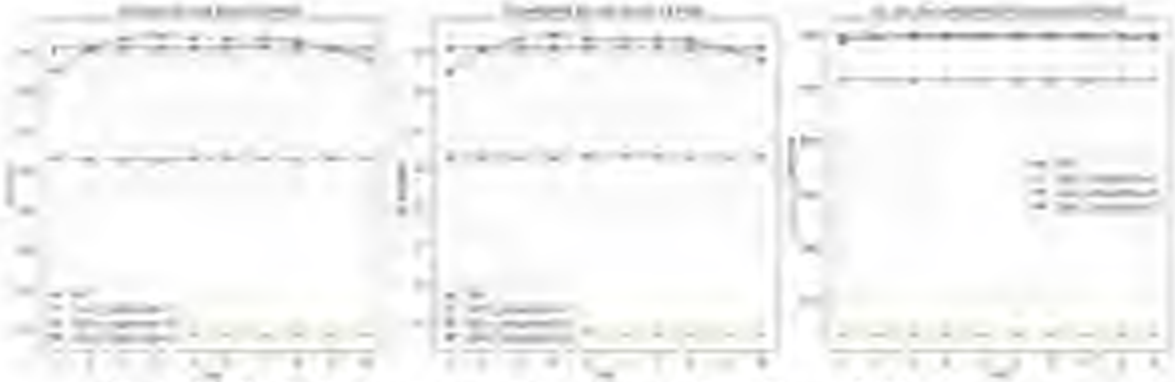


Fig. 6. MLP classification metrics depending on the number of LDA components

Table 3 shows the results for three LDA variants: with 3, 8, and 13 components. All of these variants showed different results in terms of accuracy and the ability of the model to distinguish between classes.

Table 3. Metric results for models using LDA

Method	LDA, n_components=3	LDA, n_components=8	LDA, n_components=13
Accuracy scalar	0.579981	1.991004	2.884275
Robustness	0.00868	0.001539	0.000788
f1_weighted scalar	0.534332	1.991676	2.884082
roc_auc_ovr_weighted scalar	2.270142	3.025835	3.154652
Computation time	1493.27	4816.02	5706.26

For the LDA variant with 3 components, the accuracy was significantly lower, with accuracy 0.579981, f1_weighted – 0.534332, and roc_auc_ovr_weighted decreased to 2.270142. The computation time was significantly shorter – 1493.27 seconds, which makes this variant suitable for tasks where reducing processing time is a priority. The robustness in this variant was very high, 0.00868.

Increasing the number of components to 8 allowed for improving the accuracy. Accuracy increased to 1.991004, f1_weighted became 1.991676, and roc_auc_ovr_weighted reached 3.025835. The computation time of this variant was 4816.02 seconds. Robustness remained at a good level, with 0.001539.

The variant that stores 13 components performed the best among all LDA variants. Accuracy reached 2.884275, f1_weighted – 2.884082, and roc_auc_ovr_weighted was 3.154652. The computation time was 5706.26 seconds, which is longer than in the variants with a smaller number of components. Robustness was very high – 0.000788.

The LDA method showed that with an increase in the number of components, the accuracy and robustness of the model improve significantly, although the computation time increases. The variant with n_components=13 gave the best results in terms of accuracy and robustness, making it the optimal choice for tasks where high accuracy is important. If computation time is critical, you can use n_components=8, which provides a good balance between accuracy and computation time. For very fast calculations, but with less accuracy, you can use n_components=3

Conclusions.

According to the results obtained using different dimensionality reduction methods – PCA, ICA, and LDA, the choice of method and number of components significantly affects the performance of the model. Each method has its own advantages depending on the main goal: maximizing accuracy, optimizing computation time, or a balance between these two parameters. PCA showed the best results at higher values of n_components, with n_components=0.999 providing results closest to the baseline MLP classifier. This method is especially useful when accuracy is the main priority and computation time is of secondary importance. The model showed strong f1_weighted 2.819112, accuracy 2.818502, and roc_auc_ovr_weighted 3.150142, while the computation time was acceptable, 5937.73 seconds. However, for cases where processing time is critical, PCA with n_components=0.98 may be a better compromise, albeit with a slight loss in accuracy.

ICA with n_components=10 also showed good results in terms of accuracy, f1_weighted – 2.819056 and roc_auc_ovr_weighted – 3.15034, demonstrating a good balance between processing efficiency and model accuracy. For applications where faster results are needed without significant loss of accuracy, ICA with n_components=3 may be an acceptable choice, although accuracy is reduced.

As for LDA, this method showed moderate results, but variants with different numbers of components had a significant difference in performance. At n_components=13, LDA showed the best accuracy – 2.884275, f1_weighted – 2.884082, and roc_auc_ovr_weighted – 3.154652, indicating that a larger number of components is more beneficial for tasks where both accuracy and robustness of the model are critical. However, this is accompanied by an increased computation time – 5706.26 seconds. For tasks where computation time is important, LDA with n_components=8 can be used, which provides a good compromise between accuracy and speed, although with some loss of accuracy. In general, for most tasks where accuracy and robustness of the model are important, PCA with n_components=0.999 and LDA with n_components=13 are the optimal choices, although these methods require more computation resources. If the main concern is to reduce computation time, PCA with n_components=0.98 and ICA with n_components=3 may be acceptable, although with losses in accuracy. The ideal choice depends on the specific requirements of the problem, in particular, the balance between accuracy and computation time.

Overall, all data reduction methods have demonstrated the potential to significantly improve model robustness and reduce computing load without significant loss of accuracy. This is especially important for applications in the field of bionic devices, where stable and fast biosignal processing is a critical condition for effective human-machine interaction. The usage of data reduction methods such as PCA, ICA, and LDA can serve as an important step towards creating more adaptive and realistic next-generation BCIs.

References

1. Adolf A., Köllőd C., M., Marton G., Eidel W., Ilhert J. The Effect of Processing Techniques on the Classification Accuracy of Brain-Computer Interface Systems. Brain Sciences. 2024. Vol. 14. 1272. DOI: 10.3390/brainsci14121272

2. Pastukh O., Stefanyshyn V., Baran I., Yakymenko I., Vasylkiv V. Mathematics and software for controlling mobile software devices based on brain activity signals. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3628. P. 684–689

3. Xu T., Zheng W., Shan D., Yuan Q., Zhou W. Decoding spectro-temporal representation for motor imagery recognition using ECoG-based brain-computer interfaces. Journal of Integrative Neuroscience. 2020. Vol. 19. No. 2. P. 259–272. DOI: 10.31083/j.jin.2020.02.1269.

4. Bleuze A., Mattout J., Congedo M. Tangent space alignment: Transfer learning for Brain-Computer Interface. Frontiers in Human Neuroscience. 2022. Vol. 16. DOI: 10.3389/fnhum.2022.1049985.

5. Stefanyshyn I., Pastukh O., Stefanyshyn V., Baran I., Boyko I. Robustness of AI algorithms for neurocomputer interfaces based on software and hardware technologies. CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3742. P. 137–149

6. Stefanyshyn V., Stefanyshyn I., Pastukh O., Yatsyshyn V., Yakymenko I. Accuracy of software and hardware of computer systems for human-machine interaction. CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3842. P. 178–183

7. Stefanyshyn V., Stefanyshyn I., Pastukh O., Kulikov S. Comparison of the accuracy of machine learning algorithms for brain-computer interaction based on high-performance computing technologies. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. 2024. No. 3 (115). P. 82–90. DOI: 10.33108/visnyk_tntu2024-03-082

8. Hryk O., Stefanyshyn I., Stefanyshyn V., Pasnikh O. Robustness evaluation of machine learning algorithms for neurocomputer interface software using distributed and parallel computing. Computer Systems and Information Technologies. 2024. No. 2. P. 82–88. DOI: 10.31891/csit-2024-2-11.
9. Djellud K., Belkacem A.N. EEG Classification-based Comparison Study of Motor-Imagery Brain-Computer Interface. Proceedings - 2021 IEEE International Conference on Recent Advances in Mathematics and Informatics, ICRAMI 2021. 2021. DOI: 10.1109/ICRAMI52622.2021.9585902.
10. Velez-Lora H.J., Mendez-Vasquez D.J., Delgado-Saa J.F. Classification of imaginary motor task from electroencephalographic signals: A comparison of feature selection methods and classification algorithms. Revista Mexicana de Ingenieria Biomedica. 2018. Vol. 39, No. 1. P. 93–104. DOI: 10.17488/RMIB.39.1.8.
11. Kabir M.H., Akhtar N.I., Tasnim N., Miah A.S.M., Lee H.-S., Jang S.-W., Shin J. Exploring feature selection and classification techniques to improve the performance of an electroencephalography-based motor imagery brain–computer interface system. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 15. DOI: 10.3390/s24154989.
12. Kok C.L., Ho C.K., Aung T.H., Koh Y.Y., Teo T.H. Transfer learning and deep neural networks for robust intersubject hand movement detection from EEG signals. Applied Sciences (Switzerland). 2024. Vol. 14, No. 17. DOI: 10.3390/app14178701.
13. Lu Y., Wang W., Lian B., He C. Feature Extraction and Classification of Motor Imagery EEG Signals in Motor Imagery for Sustainable Brain-Computer Interfaces. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 15. Article number: 6627. DOI: 10.3390/su16156627.
14. Yu H., Baek S., Lee J., Sohn I., Hwang B., Park C. Deep Neural Network-Based Empirical Mode Decomposition for Motor Imagery EEG Classification. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2024. Vol. 32. P. 3647–3656. DOI: 10.1109/TNSRE.2024.3432102.
15. Khan R. A., Rashid N., Shahzaib M., Malik U. F., Arif A., Iqbal J., Saleem M., Shahbaz Khan U., Tiwana M. A novel framework for classification of two-class motor imagery EEG signals using logistic regression classification algorithm. PLoS ONE. 2023. Vol. 18, No. 9. e0276133. DOI: 10.1371/journal.pone.0276133.
16. Saibene A., Caglioni M., Corchs S., Gasparini F. EEG-Based BCIs on Motor Imagery Paradigm Using Wearable Technologies: A Systematic Review. Sensors. 2023. Vol. 23. 2798. DOI: 10.3390/s23052798.
17. Kuo-Kai Shyu, Szu-Chi Huang, Kai-Jen Tung, Lung-Hao Lee, Po-Lei Lee, Yu-Hao Chen. Common Spatial Pattern and Riemannian Manifold-Based Real-Time Multiclass Motor Imagery EEG Classification. IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 139457–139464. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3340685.
18. Rashmi S., Ashok V. Deep feature extraction for EEG signal classification in motor imagery tasks. In: Applied Artificial Intelligence: A Biomedical Perspective. 2023. P. 253–265. DOI: 10.1201/9781003324430-19.
19. Rosenfelder M. J., Spiliopoulou M., Hoppenstedt B., Pryss R., Fissler P., della Piedra Walter M., Kolassa I.-T., Bender A. Stability of mental motor-imagery classification in EEG depends on the choice of classifier model and experiment design, but not on signal preprocessing. Frontiers in Computational Neuroscience. 2023. Vol. 17. Article 1142948. DOI: 10.3389/fncom.2023.1142948.
20. Ketu S., Mishra P.K. Hybrid classification model for eye state detection using electroencephalogram signals. Cognitive Neurodynamics. 2022. Vol. 16, No. 1. P. 73–90. DOI: 10.1007/s11571-021-09678-x.
21. Dumitrescu C., Costea I.-M., Semenescu A. Using brain-computer interface to control a virtual drone using non-invasive motor imagery and machine learning. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, 11876. DOI: 10.3390/app112411876.
22. Saeidi M., Karwowski W., Farahani F. V., Fiok K., Taiar R., Hancock P. A., Al-Juaid A. Neural decoding of EEG signals with machine learning: A systematic review. Brain Sciences. 2021. Vol. 11, 1525. DOI: 10.3390/brainsci11111525.
23. XAI-MEDICA. URL: [illegible]
24. Scikit-learn: API Reference. URL: https://scikit-learn.org/stable/api/index.html
25. Dask: Scikit-Learn & Joblib. URL: https://ml.dask.org/joblib.html
26. Vakili M., Ghamsari M., Rezaei M. Performance analysis and comparison of machine and deep learning algorithms for IoT data classification. arXiv preprint. 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2001.09636.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-35
UDC 004.75
Khoshaba Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0001-5375-6280
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

MULTIDIMENSIONAL RESOURCE EVALUATION IN BLOCKCHAIN

Khoshaba O. Multi-Dimensional Resource Evaluation in Blockchain. The traditional gas-based metering model used in Ethereum and similar blockchain platforms simplifies execution cost estimation but fails to capture the comprehensive complexity of smart contract workloads. This paper introduces a novel multidimensional resource metering framework, designed to separately quantify computational load (based on floating-point operations - FLOPs), memory access, and execution latency. The study effectively demonstrates the framework's capability across various tasks, including compute-intensive processes, bandwidth-heavy data handling, and high-latency tasks through detailed conceptual modelling of matrix multiplication operations. The proposed model advocates for future, hardware-based metering strategies, fostering more precise resource optimization, and aligns well with contemporary trends such as multidimensional gas pricing in Layer-2 scaling solutions. Additionally, this framework offers critical insights into constructing theoretical and practical models for blockchain resource metering, significantly enhancing accuracy in cost attribution. Experimental validation using representative computational workloads, such as matrix multiplications, highlights distinct performance metrics- FLOPs, memory bandwidth, and latency- and contrasts these findings with traditional single-dimensional gas metrics. Ultimately, this research provides a robust foundation for a more equitable and efficient computational resource evaluation in blockchain systems, paving the way for better system scalability, optimization, and sustainable economic models for future blockchain applications.

Keywords: blockchain performance, resource metering, Ethereum, FLOPs, smart contracts, Layer-2, computational profiling

Хошаба О. М. Багатовимірна оцінка ресурсів у блокчейні. Традиційна модель тарифікації на основі газу, що використовується в Ethereum та подібних блокчейн-платформах, спрощує оцінку витрат на виконання, але не враховує всю складність робочих навантажень смарт-контрактів. Ця стаття представляє нову багатовимірну структуру вимірювання ресурсів, розроблену для окремої кількісної оцінки обчислювального навантаження (на основі операцій з плаваючою комою - FLOP), доступу до пам'яті та затримки виконання. Дослідження ефективно демонструє можливості фреймворку в різних завданнях, включаючи обчислювально складні процеси, обробку даних з пам'яті та завдання з високою затримкою, за допомогою детального концептуального моделювання операцій множення матриць. Запропонована модель сприяє більш точному вимірюванню на основі апаратного забезпечення, сприяє точнішій оптимізації ресурсів і добре узгоджується з сучасними тенденціями, такими як багатовимірне ціноутворення на рівні рішень масштабування рівня 2. Крім того, ця структура пропонує важливі розуміння побудови теоретичних і практичних моделей для вимірювання ресурсів блокчейну, значно підвищуючи точність відображення витрат. Експериментальна перевірка з використанням репрезентативних обчислювальних навантажень, таких як множення матриць, виділяє різні показники продуктивності - FLOP, пропускну здатність пам'яті та затримку - і порівнює ці результати з традиційними одновимірними показниками витрачання. Зрештою, це дослідження забезпечує надійну основу для більш справедливої та ефективної оцінки обчислювальних ресурсів у системах блокчейн, прокладаючи шлях до кращої масштабованості системи, оптимізації та сталих економічних моделей для майбутніх додатків блокчейну.

Keywords: продуктивність блокчейну, вимірювання ресурсів, Ethereum, FLOPs, смарт-контракти, Layer-2, обчислювальне профілювання

Introduction. The increasing complexity and diversity of decentralised applications have highlighted critical limitations in traditional blockchain accounting models, particularly in measuring and pricing computational resources. Initially designed for simple monetary transactions and basic data storage, blockchain platforms like Ethereum implemented a one-dimensional "gas" mechanism that charges users based on storage operations and rudimentary logic instructions [1]. While sufficient for earlier applications, this model fails to represent the actual computational costs incurred by modern smart contracts, which frequently involve resource-intensive processes such as matrix computations, cryptographic proof generation, and on-chain machine learning [2, 3]. As a result, a fundamental misalignment has emerged between actual resource consumption and the attribution of economic costs, creating bottlenecks, inefficiencies, and disincentives for developers to build computationally sophisticated contracts.

Problem Statement. The core problem addressed in this study is the inadequacy of current gas-based resource accounting models in representing multi-dimensional computational demands. Despite the rise of computationally intensive tasks, such as high-volume data processing and parallelisable arithmetic operations, no widely accepted method remains for quantifying computing workload beyond simple gas metrics. Traditional models conflate minimal and complex operations under similar fee structures, leading to pricing asymmetry and potential security risks due to under-costed execution. Furthermore, existing blockchain virtual machines cannot monitor advanced metrics, such as floating-point operations per second

(FLOPs), memory bandwidth, and cache efficiency [3]. This absence of granularity hinders fair cost modelling, platform optimisation, and scalability.

Motivation Statement. The motivation for this research stems from the urgent need to evolve blockchain infrastructures into platforms capable of supporting computation-intensive applications with fair and technically justified pricing models. As smart contracts expand their scope into domains requiring high-performance computing characteristics, such as decentralised AI or scientific modelling, traditional gas metering becomes a constraint rather than a safeguard [4]. By proposing and validating an extended framework for resource assessment, this study aims to align economic incentives with physical execution demands. This realignment has the potential to enhance system throughput, foster responsible code design, and ensure the long-term sustainability of blockchain ecosystems.

Relevance of the Work. This work contributes to the critical discourse on the evolution of blockchain cost models by addressing the underexplored intersection between performance engineering and decentralised resource accounting. It builds on prior work identifying the computational gap in gas economics [1] and extends the discussion toward operationalising compute-aware metrics. As such, it serves as a necessary prelude to a focused literature review, which examines related contributions, identifies methodological trends, and highlights empirical findings and technical limitations.

Related Work. Ethereum's execution model charges *gas* for computational steps and storage use, acting as an economic guard against abuse. This gas mechanism ensures that Turing-complete smart contracts are terminated and compensates miners for execution costs [5]. However, several limitations of Ethereum's gas model have been highlighted. Aldweesh et al. [6] propose an opcode benchmarking framework (OpBench) and find that gas consumed by operations is often disproportionate to the CPU time required. Empirical studies further illustrate wide variability in gas usage patterns, identifying code constructs that disproportionately increase gas consumption [1]. Grech et al. [5] demonstrate vulnerabilities arising from gas exhaustion.

Alternative execution engines such as WebAssembly (WASM)-based virtual machines have been explored. Zheng et al. [7] compared WASM and Ethereum Virtual Machines (EVMs), showing significant overheads in current WASM implementations. Li et al. [3] developed SmartVM, optimised for deep learning inference, significantly outperforming vanilla EVM. Chen et al. [8] proposed speculative transaction execution (Forerunner), which leverages parallelism to achieve higher throughput. Hardware accelerators, such as the Blockchain Processing Unit (BPU) and Smart Contract Unit (SCU), further push performance boundaries [9, 10].

Layer-2 scaling solutions, including optimistic and zero-knowledge rollups (ZK-rollups), move execution off-chain, significantly increasing throughput. Thibault et al. [11] report fee reductions and improvements in transaction processing speed (TPS) with ZK-rollups. Yet, ZK-rollups depend on computationally heavy proof generation, centralising proof generation in prover farms. Decentralised approaches, such as CrowdProve, distribute tasks to mitigate centralisation [12]. Aldweesh et al. [6] and Habib [13] analyse performance bottlenecks in ZK-proof generation.

HPC-style metrics integration is emerging in blockchain contexts. Partisia blockchain explicitly prices transactions based on CPU cycles, network traffic, and storage IO [14]. However, comprehensive HPC-style frameworks, such as those for FLOPs, cache misses, and memory bandwidth, remain underdeveloped, highlighting significant gaps in assessing computational resources.

Highlighting Previously Unsolved Parts of the Problem. Despite significant advances in blockchain architecture and resource accounting mechanisms, several core technological challenges remain unresolved in computational resource evaluation. Traditional gas models were designed with storage operations and basic arithmetic logic in mind, and therefore fail to reflect the growing heterogeneity and intensity of modern on-chain workloads [1]. As decentralised applications evolve to include machine learning inference, cryptographic proof generation, and large-scale scientific computation, existing one-dimensional cost models do not capture the diversity of computational demands [2, 4]. The lack of correlation between transaction gas fees and actual hardware utilisation remains a critical gap, resulting in inefficient pricing, potential network congestion, and developer disincentivisation.

A primary unsolved issue concerns the absence of a universally accepted set of metrics for quantifying blockchain computation. Although floating-point operations per second (FLOPs) are commonly used in high-performance computing, they fail to account for memory bandwidth, cache access efficiency, and instruction-level parallelism - factors increasingly critical in smart contract execution [3].

No standardised composite metric currently exists to measure computational workload in a decentralised, hardware-agnostic manner that could be implemented across diverse blockchain environments

Moreover, while classification of computational tasks into scalar, vector, matrix, and tensor operations has been proposed as a conceptual framework for estimating load, no practical implementation exists that translates this classification into dynamic fee computation at runtime [4]. Existing virtual machines, such as the Ethereum Virtual Machine (EVM), are not architecturally optimised to capture such differentiation in workload types. This limits the platform's ability to enforce fair cost attribution for compute-intensive operations, especially when multiple resources - such as CPU cycles, memory bandwidth, and cache usage - are jointly consumed

Another unresolved area involves implementing extended gas models that decouple storage from compute resource tracking. Although such models have been theoretically proposed [2], no major blockchain has yet operationalised a robust framework for dual-component gas accounting. Challenges include defining consistent metrics for compute gas, enforcing their measurement without compromising decentralisation, and ensuring backwards compatibility with existing smart contract ecosystems.

Using hybrid off-chain/on-chain computation models presents another frontier with persistent technological uncertainties While zero-knowledge proof systems like zk-SNARKs and zk-STARKs enable succinct verification of external computations, proof generation costs remain high, and trust assumptions regarding off-chain execution are not fully addressed [15]. Furthermore, there is no consensus on securely and transparently integrating these off-chain resource metrics into on-chain fee structures. This raises concerns about systemic fairness and auditability, particularly when different nodes have varying capacities to verify or challenge off-chain computations.

Lastly, blockchain platforms lack mechanisms for profiling and predicting the execution-time characteristics of smart contracts under real network conditions. Without runtime introspection tools that can measure and log multidimensional resource usage (e.g., memory latency, branch divergence, and throughput), it is impossible to calibrate cost models dynamically This technological gap hinders the optimisation of contracts and impedes the evolution of blockchain platforms towards truly computation-aware infrastructures.

In summary, while the limitations of current gas models are well recognised, the technological pathway towards a scalable, fair, and performance-aware computational accounting system remains largely undefined. Addressing these gaps requires further research into metric design, virtual machine instrumentation, runtime profiling, and secure hybrid computation protocols, which constitute an unsolved component of the broader problem

The Purpose of the Article. The scientific novelty of this research lies in its departure from conventional one-dimensional gas metering towards a multi-faceted evaluation of blockchain computational workloads. Traditional gas-based cost models in platforms like Ethereum prioritise storage and simple operation costs while largely overlooking the computing resources consumed by complex on-chain processes [1]. This limitation has become increasingly evident as emerging decentralised applications, such as on-chain machine learning, cryptographic proof generation, and decentralised scientific computing, demand intensive computations that current gas metrics fail to fairly or accurately account for [2, 3]. To address this discrepancy, the article aims to develop an unconventional methodology for assessing computing resource utilisation in blockchain networks that more precisely reflects computational effort.

The primary objective of this research is to develop a multidimensional resource accounting framework that integrates performance indicators, including floating-point operations per second (FLOPs), memory bandwidth, cache efficiency, and execution time, into the evaluation of transaction costs. In pursuit of this aim, the study first critically analyses the inadequacies of the existing gas model by examining how high-complexity operations (e.g., matrix multiplications and tensor contractions) can exhaust gas limits without providing a meaningful or proportional representation of resource usage [1, 2]. A structured classification of computational tasks - spanning scalar, vector, matrix, and tensor operations - is then proposed to delineate their distinct resource footprints, reinforcing the argument that a singular storage-focused metric is fundamentally inadequate.

Building on this taxonomy, the article introduces an extended gas model that conceptually separates storage-related costs from compute-related costs, enabling a more granular and equitable resource allocation This bifurcated model draws on established performance metrics from high-performance computing, thus representing an interdisciplinary synthesis between blockchain systems and computational

benchmarking [3]. Notably, the framework is designed to be modular and adaptable, enabling dynamic fee calculations based on actual execution profiles rather than static estimates.

In addition, the research explores hybrid on-chain/off-chain models as part of Layer-2 scaling strategies, where computationally expensive processes are executed externally and verified on-chain via succinct cryptographic proofs, such as zk-SNARKs and zk-STARKs [4, 15]. These models offer the dual advantage of scalability and verifiability while laying the foundation for performance-aware cost attribution based on execution provenance. Within this context, the research identifies key tasks: (1) evaluating the empirical correlation between traditional gas consumption and actual computing workload, (2) developing weighted cost functions for various operation classes, and (3) designing a verification and billing protocol for hybrid computations.

By achieving these objectives, the study contributes to the redefinition of fairness and efficiency in blockchain resource accounting, promoting a model where computational effort, rather than just data persistence, drives transaction pricing. This paradigm shift from simplistic gas regimes to multidimensional, performance-oriented metrics constitutes a significant step toward scalable, economically sustainable blockchain ecosystems better aligned with the computational demands of contemporary decentralised applications [1 - 4, 15].

Proposed Methodology. We propose a multidimensional resource evaluation model to assess the computational cost of smart contracts more accurately. This model goes beyond the one-dimensional gas metric used in Ethereum and similar blockchains [16]. Instead of assigning a single "gas" value to an operation, we characterise each operation by several resource metrics: (i) floating-point operations (FLOPs), (ii) memory access volume, and (iii) execution latency. These dimensions reflect the CPU and memory consumption, comprehensively characterising the workload.

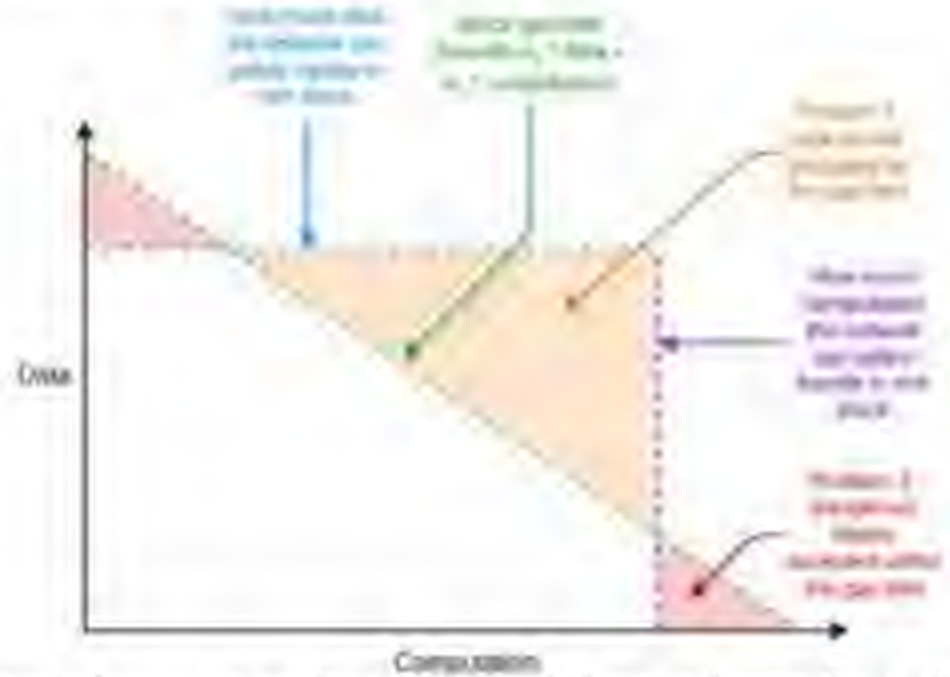


Fig. 1. Conceptual comparison: one-dimensional vs. multi-dimensional resource limits (adapted from [17]).

Figure 1 illustrates the limitations of Ethereum's one-dimensional gas model in capturing the actual multi-resource constraints of block execution [17]. The diagram presents a two-dimensional space, where the horizontal axis denotes the amount of computation in a block and the vertical axis represents the volume of data. Each axis is bounded by the maximum amount of computation or data the network can safely process within a single block. These boundaries are visualised as dashed lines - horizontal for data and vertical for computation – reflecting safe operational thresholds.

The green dashed diagonal line represents the traditional block gas limit, modelled as a linear combination of weighted data and computation terms. While this constraint provides a scalar limit on total

resource usage, it introduces critical inefficiencies. Specifically, two problem areas are highlighted in the diagram. The first, shown in orange, represents blocks that would be safe to execute - i.e., those that lie within the safe zones for computation and data - but are nonetheless excluded due to the linear gas constraint. This constitutes under-utilisation of available resources and indicates inefficiency in the existing metering system.

Conversely, the second problem area, shown in red, corresponds to blocks that satisfy the gas constraint yet exceed safe thresholds for either data or computation. Such blocks are potentially dangerous, as they risk overwhelming network nodes despite being formally accepted under the one-dimensional gas budget. The figure thus underscores the inadequacy of the scalar gas metric in enforcing safety boundaries independently for each resource type. It motivates adopting multidimensional models, where computation and data are metered and constrained along separate axes, aligning execution policies with real system capacities more effectively.

Algorithm 1 (Figure 2) begins by initialising three counters to zero: one for the total number of steps, one for the count of arithmetic operations (denoted as FLOPs), and one for the volume of memory accessed. The algorithm then examines each instruction in the input sequence individually. For each instruction, the steps counter is incremented by one, reflecting the execution of that instruction. If the current instruction is an arithmetic operation (an addition or multiplication), the FLOPs counter is incremented by one. Otherwise, if the instruction is a memory load or store operation (a memory access), the algorithm increases the memory counter by the number of bytes accessed by that instruction. Instructions that are neither arithmetic nor memory operations do not affect the FLOPs or memory counter but are still counted as steps. Once all instructions have been processed, the algorithm returns the three counters corresponding to the total number of steps, the total number of FLOPs, and the total number of bytes of memory accessed. In this way, the algorithm produces a multi-dimensional resource profile of the instruction sequence, quantifying its computational and memory demands.

Algorithm 1 Multi-dimensional resource evaluation

```
function EVALUATECONTRACT(instructions)
    metrics ← {FLOPs: 0, MemoryBytes: 0, Steps: 0}
    for each instr in instructions do
        metrics.Steps ← metrics.Steps + 1
        if instr is arithmetic then
            metrics.FLOPs ← metrics.FLOPs + 1
        else if instr is memory load/store then
            metrics.MemoryBytes ← metrics.MemoryBytes + bytes accessed
        end if
    end for
    return metrics
end function
```

Fig. 2. Algorithm of Multi-dimensional resource evaluation

Table 1 presents a comparative overview of hypothetical computational metrics for operations of increasing complexity, including scalar multiplication, vector dot product, and matrix multiplication. For each operation, four distinct metrics are reported: the number of floating-point operations (FLOPs), the volume of memory accessed in bytes, the estimated execution latency in abstract processing steps, and the corresponding gas cost as per a conventional blockchain metering system. As the table illustrates, scalar operations involve minimal resource consumption across all dimensions. In contrast, more complex tasks, such as vector and matrix computations, incur progressively higher values in each metric category.

In particular, the matrix multiplication operation exhibits a markedly higher resource footprint, with a reported 1900 FLOPs, 8400 bytes of memory usage, and 1000 latency steps, corresponding to a gas cost of 10,000 units (Table 1). Latency is modelled in logical instruction steps, reflecting the sequential operations required in a typical execution path. This trend demonstrates the non-linear scaling of resource consumption as operational complexity increases. The table highlights the central argument of the article: that a one-dimensional gas metric compresses multi-dimensional execution characteristics into a single

scalar, which may fail to capture the cost profile of diverse operations accurately. It also highlights the need for a multi-dimensional metering framework that accounts separately for computational, memory, and temporal resource dimensions.

Table 1. Hypothetical metrics vs. gas for operations of varying complexity

Operation	FLOPs	Memory (bytes)	Latency (steps)	Gas cost
Scalar a * b	1	8	1	5
Vector dot product (len. 10)	19	80	10	10
Matrix multiply (10 × 10)	1900	8400	1000	10000

Algorithm 2 (Figure 3) performs standard matrix multiplication for two square matrices of size $N \times N$. The procedure begins by iterating over each row index of the resulting matrix. It iterates over every column index for each row to compute the corresponding element in the output matrix. Initially, each output element is assigned a value of zero. Then, for each combination of row and column, the algorithm traverses the full range of indices along the shared dimension of the input matrices. At each step of this inner loop, it retrieves one element from the current row of the first input matrix and one element from the corresponding column of the second input matrix. These two elements are multiplied, accumulating the result into the previously initialised output element. This accumulation continues until all contributions for that particular output cell are computed. The process repeats for every element in the output matrix, ultimately resulting in a full matrix product. This algorithm follows the classical triple-nested loop structure, with a time complexity that grows cubically with the size of the matrices. It is widely used as a benchmark in computational resource analysis due to its predictable arithmetic intensity and uniform memory access patterns.

Algorithm 2 Matrix multiplication pseudocode ($N \times N$)

```
1. for i ← 1 to N do
2.     for j ← 1 to N do
3.         C[i, j] ← 0
4.         for k ← 1 to N do
5.             C[i, j] ← C[i, j] + A[i, k] * B[k, j]
6.         end for
7.     end for
8. end for
```

Fig. 3. Algorithm of Matrix multiplication pseudocode *(N × N)*

The traditional gas model conflates distinct resource categories. In contrast, our model generates a resource vector: *FLOPs, MemoryBytes, and Latency* per contract. Using the matrix multiplication example *(N=10)*: FLOPs=1900, Memory=8400 bytes, Latency=1000$ steps. The estimated Ethereum gas cost would be approximately 10,000 units, highlighting the memory-bound nature of the task.

This granularity enables improved analysis, optimisation, and potentially multi-dimensional fee markets [18]. Thus, the methodology supports fairness, efficiency, and hardware-aware execution limits for smart contracts.

Experimental Validation. To validate the effectiveness of the proposed multi-dimensional resource model, we conducted a conceptual simulation using matrix multiplication as a representative compute-intensive workload. Matrix multiplication is chosen because it involves many operations and a non-trivial memory footprint, making it an illustrative case for comparing resource accounting models. In the traditional Ethereum gas model, all computational and memory operations are collapsed into a single *gas* metric [16]. This one-dimensional measure simplifies fee calculation but conflates distinct resource types.

In our simulation, we compute the product of two $N \times N$ matrices using the classical triple-nested loop algorithm. We consider three matrix sizes ($N = 5, 10, 15$) and measure four quantities: traditional gas cost, number of floating-point operations (FLOPs), memory usage in bytes, and execution latency. Results are summarised in Table 2.

Table 2. Comparison of traditional gas cost and multi-dimensional resource metrics for N × N matrix multiplication

Matrix size N	Gas cost (units)	FLOPs	Memory (bytes)	Latency (ms)
5	925	225	600	0.2
10	7700	1900	2400	1.9
15	26325	6525	5400	6.5

This study's latency is represented using two distinct units depending on the context of the analysis. In Table 1, latency is expressed in abstract *steps*, corresponding to logical execution cycles within a virtualised or algorithmic environment. This abstraction allows hardware-independent comparisons between operations of varying complexity, particularly within a pseudocode or EVM-like model. In contrast, Table 2 adopts a more concrete representation by reporting *millisecond latency* derived from simulated or estimated wall-clock execution time on a hypothetical reference system. This dual representation reflects the theoretical instruction-level view of contract execution and its practical runtime implications. Such a distinction captures an operation's structural complexity and potential performance on real-world infrastructure.

The gas cost curve closely tracks the FLOPs, confirming that Ethereum gas is primarily proportional to the computational steps required. Memory usage increases at a lower rate ($O(N^2)$), and latency scales similarly to FLOPs under a sequential model. These diverging patterns suggest that the traditional model may inaccurately represent the actual workload of memory-intensive or latency-bound tasks.

From these results (Figure 4), the proposed model provides a richer profile: $N = 15$ matrix multiplication shows FLOPs=6525, memory=5400 bytes, and latency=6.5 ms versus a singular gas cost of 26,325. In future architectures, each component could be priced differently or capped separately. Therefore, multidimensional resource models can support better optimisation, fairer fee design, and improved performance diagnosis for smart contracts.

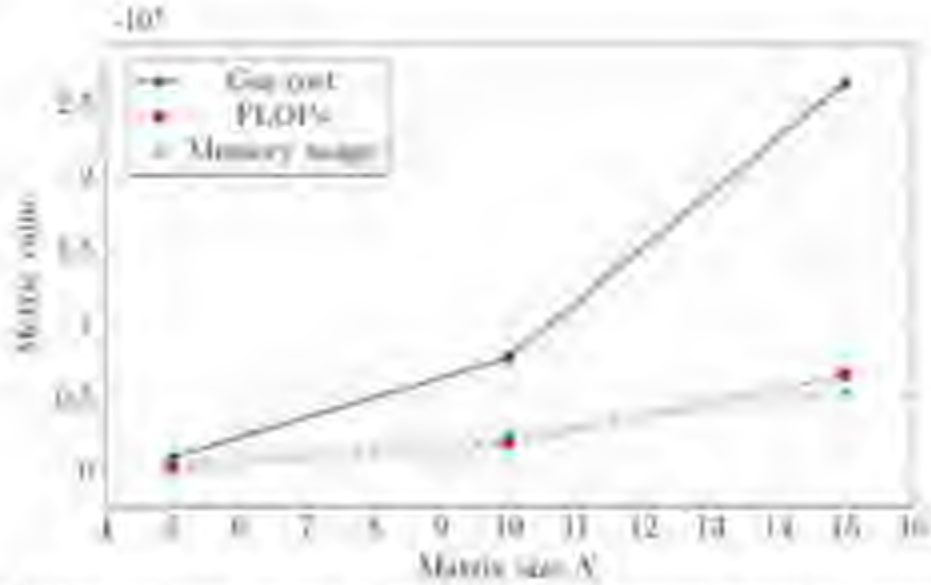


Fig. 4. Scaling traditional gas cost vs. multi-dimensional resource metrics with matrix size.

Figure 4 illustrates the scaling of gas cost, floating-point operations (FLOPs) and memory usage as a function of matrix dimension *N*. All three metrics increase with *N*, but at markedly different rates. In particular, gas cost and FLOPs grow nonlinearly (approximately cubically in *N*, i.e., *O(N^3)*, reflecting the arithmetic complexity of matrix multiplication. In contrast, memory usage increases only quadratically *(O(N^2))*, as storing an *N×N* matrix requires approximately *N^2* space. This divergence indicates that a one-dimensional gas metric primarily captures arithmetic operations escalates far more rapidly than the memory requirement as *N* increases. Consequently, relying solely on gas cost to characterise performance would disproportionately emphasise the computational load while understating memory consumption, highlighting the inadequacy of a one-dimensional gas metric in capturing the full resource usage.

Discussion. The proposed multi-dimensional resource model provides a significantly more nuanced assessment of execution costs than the traditional EVM gas metric. By tracking computation (FLOPs), memory usage, and latency separately, the model directly addresses the coarse-grained nature of Ethereum's single-dimensional gas fee [16]. In particular, Buterin observes that treating different resource constraints as a single combined gas limit can exclude many safe blocks or admit unsafe ones, potentially halving the effective throughput [17]. Our analysis confirms this: many blocks deemed "full" under a one-dimensional gas constraint are far from saturating individual resources, allowing separate dimensions to unlock wasted capacity. Empirical studies also show that a single gas budget often misjudges resource-intensive transactions: low-gas transactions may still require substantial CPU or I/O time [19].

Methodologically, a key strength of our approach is categorising operations by their dominant resource usage and exposing hidden cost factors. Previous analyses have noted that Ethereum's gas compresses CPU, memory, and storage costs into a single value [16], inevitably leading to under- and over-priced opcodes. In our model, each EVM opcode's FLOP count, memory footprint and access latency are explicitly accounted for. This fine-grained profiling lets us identify which instructions are CPU-bound versus memory-bound, and suggests more balanced fee adjustments.

These benefits come with notable trade-offs. Block construction becomes a multi-dimensional knapsack problem rather than a simple one-dimensional packing, which is NP-complete. The usual greedy heuristic no longer trivially applies. Similarly, the fee mechanism grows more complex: users must specify bids or tips for each resource type. Implementing this model requires clients to instrument FLOP counts and memory access latency at runtime, which might incur overhead or variance.

By comparison, the traditional EVM gas model sacrifices such precision for simplicity. It compresses heterogeneous costs into a single scalar, yielding efficient market mechanisms, but at the cost of misaligned incentives. As documented, I/O-intensive opcodes were underpriced for years, resulting in denial-of-service vulnerabilities until they were corrected. Our model would align fees with these factors at the protocol level.

Ethereum is already moving in this direction: the Dencun upgrade introduced a "blob" space as a separate fee dimension for rollup calldata [17]. Our framework could extend such ideas to incorporate execution-time or latency dimensions. Likewise, Layer-2 networks could apply a similar multi-dimensional scheme to distinguish settlement from computation costs. Future integration may include EIPs that adjust memory or latency gas formulas, or new fee markets that leverage real-time resource profiling.

Conclusions and Future Work. This work comprehensively analyses blockchain resource metering through a multi-dimensional lens. We introduced a model that concurrently tracks computational (FLOPs), memory, and latency costs, revealing a significant divergence between Ethereum's conventional gas accounting and actual workload. By classifying operations according to dominant resource demand, we have shown which opcodes are CPU-bound versus memory-bound, and thus which are mispriced. Our simulation framework illustrated how pricing and scheduling strategies impact performance under this model. Looking forward, several research directions emerge. One is integration into Layer-2 networks and emerging protocols. Rollup architectures could employ separate price dimensions for on-chain data and off-chain computation. Another direction is the development of adaptive synthetic benchmarks tailored to blockchain workloads. Finally, adaptive resource-profiling systems embedded in clients could monitor performance and dynamically adjust resource pricing. These efforts could yield more scalable and equitable systems by ensuring that fees reflect the actual cost of computation in a heterogeneous network environment.

References

1. Khan, M.M.A., Sarwar, U.M.A., Awais, M. Gas consumption analysis of Ethereum blockchain transactions // Concurrency and Computation: Practice and Experience. 2022. Vol. 34, no. 3. P. e6679. DOI: 10.1002/cpe.6679.
2. Zheng, Z., Yang, S., Dai, M., Liu, Y., Zhao, S. Agatha: Smart contract for DNN computation [Electronic resource] // arXiv preprint arXiv:2105.04919. 2021. URL: https://arxiv.org/pdf/2105.04919.pdf. (accessed: 2025-06-07).
3. Li, T., Wang, H., Zheng, Z., Wu, L., Wu, J., Ni, L., Hu, B. SmartVM: A Smart Contract Virtual Machine for Fast On-Chain DNN Computations // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2022. Vol. 33, no. 12. P. 4100–4116. DOI: 10.1109/TPDS.2022.3166867.
4. Park, S., Lee, J., Kim, H. Efficient computation offloading for Ethereum DApps // Journal of Industrial Information Integration. 2023. Vol. 31. Article ID 100411. DOI: 10.1016/j.jii.2023.100411.
5. Grech, N., Van Geethem, T., Joosten, J., Van Cutsem, T. MadMax: Surviving Out-of-Gas Conditions in Ethereum Smart Contracts // Proceedings of the ACM on Programming Languages. 2018. Vol. 2. Article ID 116. DOI: 10.1145/3276503.
6. Aldweesh, A., Alharby, M., van Moorsel, A. The OpBench Ethereum opcode benchmark framework: Design, implementation, validation and experiments // Performance Evaluation. 2021. Vol. 146. Article ID 102168. DOI: 10.1016/j.peva.2021.102168.
7. Zheng, S., Wang, H., Wu, L., Huang, G., Liu, X. VM matters: a comparison of WASM VMS and EVMS in the performance of blockchain smart contracts [Electronic resource] // arXiv preprint arXiv:2012.01032. 2020. URL: https://arxiv.org/pdf/2012.01032.pdf. (accessed: 2025-06-07).
8. Chen, Y., Guo, Z., Li, R., Chen, S., Zhou, L., Zhou, Y., Zhang, X. Forerunner: Constraint-based Speculative Transaction Execution for Ethereum. Proceedings of the 28th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP'21) (Virtual Event, Germany, October 26–29, 2021). ACM, 2021. pp. 570–587. DOI: 10.1145/3477132.3483564.
9. Liu, T., Peng, L. BPU: A Blockchain Processing Unit for Accelerated Smart Contract Execution // Proceedings of the 57th ACM/IEEE Annual Design Automation Conference (DAC), San Francisco, CA, July 2020. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1145/3394648.3400650.
10. Liu, T., Peng, L. SCU: A Hardware Accelerator for Smart Contract Execution // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain 2023), December 2023. 2023. P. 356–361. DOI: 10.1109/Blockchain58893.2023.00067.
11. Thibault, L.T., Sarry, T., Hafid, A.S. Blockchain Scaling using Rollups: A Comprehensive Survey // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 93039–93054. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3204996.
12. Stephan, J., Kienast, P., Lantsberg, Y., Wibmer, N., Seringer, R. CrowdProve [Electronic resource] // arXiv preprint arXiv:2501.03126. 2025. URL: https://arxiv.org/pdf/2501.03126.pdf. (accessed: 2025-06-07).
13. Habib, M.A. Analyzing Performance Bottlenecks in Zero-Knowledge Proof Based Rollups on Ethereum [Electronic resource] // arXiv preprint arXiv:2503.22709. 2024. URL: https://arxiv.org/pdf/2503.22709.pdf. (accessed: 2025-06-07).
14. Partisia Blockchain. Transaction gas prices. Partisia Docs. 2021. URL: https://partisiablockchain.gitlab.io/documentation/smart-contracts/gas/what-is-gas.html (accessed: 09.06.2025).
15. Teutsch, J., Reitwießner, C. A scalable verification solution for blockchains [Electronic resource] // arXiv preprint arXiv:1908.04756. 2019. URL: https://arxiv.org/pdf/1908.04756.pdf. (accessed: 2025-06-07).
16. Perez, D., Livshits, B. Broken Metre: Attacking Resource Metering in EVM // Proceedings of the 27th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS 2020), 2020. DOI: 10.14722/ndss.2020.24076.
17. Buterin, V. Multidimensional Gas Pricing [Electronic resource]. 2024. URL: https://vitalik.eth.limo/. (accessed: 2025-06-07).
18. Diamandis, T., Tan, J., Li, Y., Wang, X. Designing Multidimensional Blockchain Fee Markets // Proceedings of the ACM Conference on Advances in Financial Technologies (AFT 2023), 2023. P. 41–23. DOI: 10.1145/3610427.3610431.
19. Wood, G. Ethereum: A Secure Decentralised Generalised Transaction Ledger : Yellow Paper. [S.l.]: Ethereum Foundation, 2014. [Electronic resource]. URL: https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf. (accessed: 2025-06-07).

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-36
УДК 621.317.39:534.1.534.6
Дімова Ганна Олегівна, к.т.н., PhD, доцент
https://orcid.org/0000-0002-5294-1756
Херсонський державний аграрно-економічний університет, м. Херсон, Україна

АНАЛІЗ ВІБРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Дімова Г. О. Аналіз віброакустичних сигналів для діагностики технічного стану електромеханічного обладнання. У статті розглянуто методологічні та прикладні аспекти аналізу віброакустичних сигналів, що використовуються для діагностики технічного стану електромеханічного обладнання. Основну увагу приділено функціональній діагностиці як складовій системи управління технічним станом об'єкта. Показано, що ефективність виявлення дефектів значною мірою залежить від здатності виділяти і аналізувати різні типи коливальних сигналів: періодичні, імпульсні та ударні. Окремо проаналізовано можливості спектрального аналізу низькочастотних вібрацій для роторних машин, а також особливості застосування високочастотного аналізу для діагностики підшипникових вузлів і систем зворотно-поступального дії. Розглянуто методи SPM та акустичних емісій, що забезпечують високий рівень чутливості до макродефектів. Описано підходи діагностики в середньочастотному діапазоні, що обумовлено складною структурою коливальних процесів і великою кількістю резонансів. Підтверджено доцільність застосування статистичних методів для аналізу випадкових вібрацій, зокрема розрахунку пікових значень, коефіцієнтів асиметрії та ексцесу, а також визначення порогових значень діагностичних параметрів. Показано перспективність вейвлет-аналізу та автоматизованих цифрових методів обробки сигналів для підвищення достовірності діагностики. Отримані результати можуть бути використані при розробці автоматизованих систем контролю та обґрунтування технічного стану обладнання за фактичним станом.

Ключові слова: віброакустичний сигнал, технічний стан, функціональна діагностика, спектральний аналіз, SPM-метод, акустична емісія, вейвлет-аналіз, гармонійна вібрація, автоматизовані системи контролю

Dymova H. Analysis of Vibroacoustic Signals for Diagnosing the Technical Condition of Electromechanical Equipment. The article considers methodological and applied aspects of the analysis of vibroacoustic signals used to diagnose the technical condition of electromechanical equipment. The main attention is paid to functional diagnosing as a component of the technical condition management system of facilities. It is shown that the efficiency of defect detection largely depends on the ability to isolate and analyze different types of vibrational signals: periodic, impulse, and shock. The possibilities of spectral analysis of low-frequency vibrations for rotary machines, as well as the features of the application of high-frequency analysis for the diagnosing rolling bearings and reciprocating units, are separately analyzed. SPM and acoustic emission methods are considered, which provide a high level of sensitivity to macrodefects. The diagnosing difficulties in the mid-frequency range are described, which are due to the complex structure of oscillatory processes and a large number of resonances. The expediency of using statistical methods for analyzing random vibrations is emphasized, in particular, calculating mean square values, asymmetry and kurtosis coefficients, as well as determining threshold values of diagnostic parameters. The prospects of wavelet analysis and automated digital signal processing methods for increasing the reliability of diagnostics are indicated. The results obtained can be used in the development of automated systems for monitoring and maintaining the technical condition of equipment based on the actual condition.

Keywords: vibroacoustic signal, technical condition, functional diagnosing, spectral analysis, SPM method, acoustic emission, wavelet analysis, random vibration, automated control systems

Постановка проблеми. Сучасні методи діагностики електромеханічного обладнання, зокрема вібраційного аналізу, демонструють високу ефективність лише для обмеженого класу об'єктів або умов. Однак складна структура коливальних процесів, присутність як детермінованих, так і випадкових компонент, обмежений доступ до деяких вузлів, а також недостатня чутливість традиційних методів у середньочастотному діапазоні створюють значні труднощі при оцінюванні технічного стану багатьох типів машин. Проблема ускладнюється ще й тим, що обробка сигналів потребує чіткого поділу їх на різні компоненти без втрати діагностичної інформації, а існуючі методи не завжди забезпечують належний рівень достовірності. Це зумовлює потребу в удосконаленні підходів до аналізу віброакустичних сигналів, зокрема із залученням сучасних цифрових, статистичних та адаптивних методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика віброакустичної діагностики електромеханічного обладнання активно досліджується у зв'язку з переходом промислових підприємств до концепції технічного обслуговування за фактичним станом. У працях вітчизняних та зарубіжних дослідників [1, 2] відзначено, що традиційні методи спектрального аналізу низькочастотних сигналів є ефективними для роторного обладнання, проте не забезпечують достатньої інформативності при діагностиці складних систем, зокрема зворотно-поступальної дії або компактних механізмів з обмеженим доступом до вузлів.

Ряд досліджень присвячено застосуванню методу ударних імпульсів (SPM), якій започатковано шведськими інженерами для виявлення мікродефектів у підшипниках кочення [3]. У подальших роботах цей підхід було адаптовано до діагностики насосного обладнання, систем подачі палива та редукторів. Метод акустичної емісії, що знайшов широке застосування у визначенні мікротріщин у посудинах під тиском та статично навантажених елементах, також активно використовується для аналізу вібраційних сигналів у високочастотному діапазоні [4].

У роботах дослідників різних країн [5] було закладено основи виділення випадкових складових вібраційного сигналу за допомогою широкосмугових та адаптивних фільтрів. Подальші дослідження підтвердили, що значний обсяг діагностичної інформації міститься в модуляціях потужності випадкової вібрації, які відображають гідродинамічні й аеродинамічні ефекти.

Значну увагу в останні роки приділяють використанню вейвлет-аналізу для обробки імпульсних сигналів складної структури, а також розвитку цифрових алгоритмів демодуляції (на основі перетворення Гільберта) з метою виділення амплітудної або частотної модуляції, що виникає при розвитку дефектів. Паралельно розробляються системи автоматизованої обробки даних, в тому числі з використанням елементів машинного навчання, для підвищення об'єктивності оцінювання технічного стану.

Таким чином, сучасний рівень досліджень демонструє як ефективні рішення для окремих класів обладнання, так і наявність невирішених проблем щодо обробки складних сигналів у широкому частотному діапазоні.

Виділення раніше не вирішених частин проблеми. Незважаючи на тривалий розвиток методів віброакустичної діагностики, у цій галузі досі існують кілька важливих аспектів, що залишаються недостатньо вирішеними і суттєво ускладнюють практичне впровадження функціональної діагностики електромеханічного обладнання, особливо в умовах змінного навантаження, складної коливальної структури та обмеженого доступу до контрольних точок. Однією з ключових проблем є відсутність уніфікованих підходів до виділення та інтерпретації змішаних вібраційних сигналів, які у реальних умовах експлуатації майже завжди містять поєднання періодичних, випадкових та ударних компонентів. Їх взаємне накладання створює додаткові труднощі для традиційного спектрального аналізу, особливо у середньочастотному діапазоні, де жодна складова не є домінуючою.

Ще одним суттєвим ускладненням є складність діагностики в умовах багатокомпонентної резонансної структури, що характерна для обладнання з великою кількістю вузлів і складними коливальними зв'язками, зокрема для поршневих машин і авіаційних двигунів. У таких системах традиційні методи виявляються малоефективними через накладання численних гармонік і наявність високодобротних резонансів. До цього додається ще одна проблема – недостатня розробленість статистичних методів аналізу в умовах нестаціонарності. Більшість відомих статистичних підходів, таких як розрахунок середньоквадратичного значення, асиметрії або ексцесу, ґрунтуються на припущенні про стаціонарність сигналу, що суттєво обмежує їхню застосовність у динамічно змінних режимах роботи обладнання.

Крім того, ускладнення викликає низький ступінь автоматизації процесів обробки складних вібраційних сигналів. Незважаючи на наявність цифрових методів, зокрема вейвлет-аналізу та фільтрації гармонік, їх застосування здебільшого зводиться до локальних технічних рішень. Інтегровані системи адаптивної обробки віброакустичних сигналів у реальному часі ще не набули широкого поширення через обмеження у практичній реалізації. Саме цим нерозв'язаним аспектам дослідженню структури складних вібраційних сигналів, оцінці ефективності наявних підходів та визначенню напрямів їх удосконалення – й присвячено дану наукову працю.

Метою дослідження є узагальнення та аналіз сучасних методів обробки віброакустичних сигналів різної природи (періодичних, випадкових та імпульсних) для підвищення ефективності діагностики технічного стану електромеханічного обладнання, з акцентом на проблемні ділянки спектру, зокрема середньочастотний діапазон.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основною метою функціональної діагностики (ФД) електромеханічного обладнання є визначення типу технічного стану об'єкта, особливо коли йдеться про складні системи. Водночас ФД не слід ототожнювати з процесом контролю. Перевірка технічного стану (ТС) об'єкта – це форма управління цим об'єктом, яка здійснюється відповідно до завдання, визначеної програми. Розробка програми перевірки, яка є оптимальною для певної цільової функції, по суті є еквівалентом організації оптимального процесу управління, метою якого є ідентифікація технічного стану. Такий процес перевірки зазвичай реалізується у вигляді

керованого процесу з багаторазовою подачею керуючих впливів. При цьому керуючі дії можуть мати складну структуру, а їх послідовність визначається реакцією об'єкта на попередні дії. Функціональну структуру діагностичної системи управління можна подати, як показано на рисунку 1.

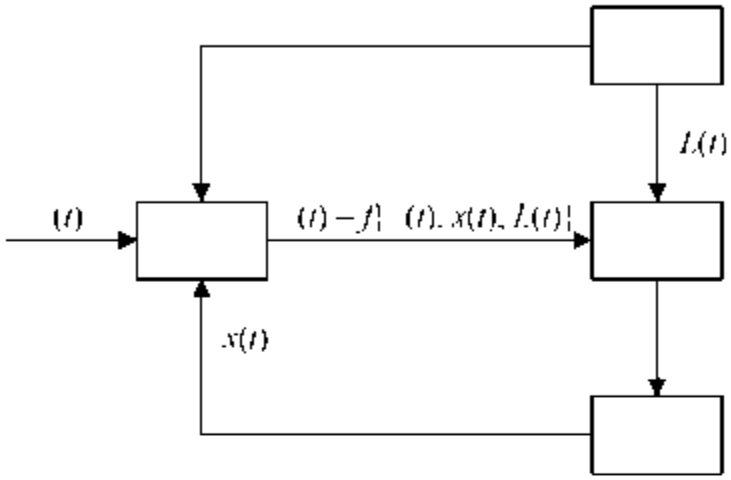


Рис. 1. Функціональна структура системи управління для діагностики

ОП – об'єкт, що підлягає перевірці; ЗС – зовнішнє середовище; ПІТС – підсистема, що здійснює перевірку технічного стану об'єкта; УП – пристрій, що виконує функції управління; $\alpha(t)$ – цільова установка управління у момент часу t; $L(t)$ – характеристики зовнішнього середовища у часі t.

$x(t)\{x_1, \ldots, x_n\}$ – параметри, що характеризують технічний стан об'єкта при перевірці;

$\xi(t) = f\{\alpha(t), x(t), L(t)\}$ – керуючий вплив, сформований як функція цільової установки, параметрів перевірки та впливу зовнішнього середовища

Отже, ФД охоплює специфічні керовані процеси, які потребують створення спеціалізованих методів дослідження для побудови оптимальних схем управління. Основою управління технічним станом (ТС) є процеси перевірки та відновлення цього стану. Головною метою ФД є ефективна організація такого управління, що водночас є інструментом підвищення надійності обладнання. Саме забезпечення високої надійності є ключовою сферою застосування функціональної діагностики.

Щоб краще зрозуміти межі застосування ФД, варто розглянути різні типи задач, пов'язаних із визначенням технічного стану. Найбільш поширеним є визначення поточного технічного стану об'єкта – це так звана діагностична задача (визначення або розпізнавання). Другий тип задач пов'язаний із прогнозуванням технічного стану, в якому перебуватиме об'єкт у певний момент часу в майбутньому. Це вже задача прогнозування. До третього типу належать задачі, пов'язані з визначенням технічного стану об'єкта в минулому. Такі задачі належать до генези (походження або виникнення). Задачі першого типу відносяться безпосередньо до функціональної діагностики (ФД), другого типу – до технічної прогностики (ТП), а третього – до технічної генетики (ТГ).

Таким чином, достовірна інформація про фактичний технічний стан об'єкта перевірки є необхідною як для розв'язання задач генези, так і для прогнозування, а отже, технічна діагностика виступає основою як технічної генетики, так і технічної прогностики.

Вібрації, що реєструються в контрольних точках працюючого обладнання, є наслідком дії коливальних сил у різних вузлах на механічну коливальну систему, яка характеризується індивідуальними передавальними властивостями для кожного джерела таких сил до кожної точки вимірювання. У загальному випадку коливальні сили складаються з періодичних, випадкових та ударних компонентів, а передавальні характеристики визначаються амплітудно-частотними та фазо-частотними параметрами.

Щоб отримати максимально повну діагностичну інформацію, приховану в структурі коливальних сил, необхідно розкласти вібраційний сигнал на окремі складові (періодичні, випадкові, ударні) та проаналізувати кожну з них окремо, враховуючи передавальні характеристики

системи. Однак практичне розв'язання цього завдання є надзвичайно складним, тому на практиці зазвичай вивчаються лише окремі випадки.

Саме з аналізу таких окремих випадків і почалося практичне застосування різних напрямів функціональної вібраційної діагностики машин і обладнання. У роторних машинах на низьких частотах ударні складові коливальних сил майже не проявляються, внесок випадкових складових є незначним, а передавальні характеристики мають обмежену кількість резонансів. Завдяки цьому за низькочастотною вібрацією (як правило, до 1000 Гц) роторного обладнання можна доволі точно визначити як характеристики самих коливальних сил, так і параметри коливальної системи. Основним методом отримання діагностичної інформації в цьому випадку є спектральний аналіз вібрацій, зафіксованих у різних точках та напрямках.

Спектральний аналіз низькочастотної вібрації є одним з провідних методів функціональної діагностики, що дозволяє виявляти до 50% потенційних дефектів роторного обладнання задовго до виникнення критичних ситуацій.

Проте в машинах зворотно-поступальної дії, наприклад у двигунах внутрішнього згоряння, через значну присутність ударних сил інформативність спектру низькочастотної вібрації значно знижується. Для таких типів обладнання виникає потреба у застосуванні додаткових, не лише вібраційних, діагностичних методів.

Інший напрямок функціональної вібраційної діагностики пов'язані з аналізом високочастотної вібрації вузлів – джерел коливальних сил в різних видах обладнання. Початок цим методам дали шведські фахівці, запропонувавши спосіб аналізу ультразвукової вібрації підшипників кочення, порушуємо мікроудари при розривах масляної плівки, що отримав назву методу ударних імпульсів (SPM-метод) [3]. Саме в цьому діапазоні частот вібрація дефектних підшипників порушується тільки ударними імпульсами, а коливальну систему з практично достатньою точністю можна розглядати як суцільне середовище з обмеженим коефіцієнтом втрат. Аналогічні уявлення використовуються і в методі акустичної емісії, коли джерелами ударних імпульсів стають процеси формування мікротріщин в статично навантажених конструкціях. SPM-метод широко використовується для контролю стану підшипників кочення і систем імпульсної подачі палива в двигунах внутрішнього згоряння, а метод акустичної емісії - для діагностики судин під тиском.

Новий ступінь розвитку методів вібраційної діагностики вузлів устаткування по високочастотної вібрації почалася з робіт фахівців, які використовували спектральні методи для аналізу коливань потужності виділених з сигналу вібрації випадкових компонент [4, 6]. Як виявилося, великий обсяг діагностичної інформації міститься в процесах, що модулюють потужність випадкової вібрації, порушуємо силами механічного, гідродинамічного і аеродинамічного тертя.

Випадкові складові вібрації в цьому методі, технічно реалізований таким же чином, як і відомий метод "обвідної", виділялися за допомогою широкосмугових фільтрів, в смугу частот яких не повинні були потрапляти періодичні складові. У машинах з великою кількістю періодичних складових вібрації часто не вдається вибрати досить широку смугу частот, у якому не потрапляє жодної гармонійної складової вібрації. Саме з цієї причини метод не використовувався для діагностики таких машин до тих пір, поки не було вирішено питання поділу сигналу на періодичні і випадкові компоненти без втрат діагностичної інформації. Рішення запропонували фахівці США, які використовували для цього адаптивні фільтри, що вирізують з сигналу гармонійні складові [4, 5]. Після впровадження досить потужних засобів цифрової фільтрації сигналів обсяг діагностичної інформації, яку отримують з високочастотної вібрації окремих вузлів машин і устаткування, різко зріс.

Паралельно розвивалися і методи аналізу коливальних сил і вібрації обладнання на низьких частотах, де основний вклад в сили і вібрацію вносять періодичні компоненти. Зростання обсягу одержуваної діагностичної інформації забезпечувався перш за все за рахунок ускладнення моделі аналізованих періодичних коливальних сил, які при появі дефектів у багатьох випадках виявляються модульовані по амплітуді і (або) по частоті. Для аналізу модульованих сигналів все ширше використовуються цифрові алгоритми і засоби демодуляції сигналів на основі перетворення Гільберта.

До початку XXI століття можливості вібраційного діагностики обертового обладнання зросли настільки, що вона лягла в основу заходів по переходу на обслуговування і ремонт багатьох типів обладнання по фактичному стану. На такий вид обслуговування і ремонту стало

перекладатися найбільш поширене і, перш за все, вентиляційне та насосне обладнання. У той же час для деяких типів обертового обладнання номенклатура виявляються по вібрації дефектів і достовірність їх ідентифікації ще недостатні для прийняття таких відповідальних рішень.

Найбільші труднощі у вирішенні діагностичних задач пов'язані з аналізом властивостей коливальних сил на основі середньочастотної вібрації. У цьому частотному діапазоні внесок періодичних, випадкових і ударних сил є порівнюваним за значенням, а коливальна система характеризується великою кількістю резонансів із високою добротністю. Особливо складним є аналіз для поршневих машин, де ударні сили є домінуючими.

Складність аналізу середньочастотної вібрації обмежує можливості діагностики компактного обладнання з високою питомою потужністю, наприклад, авіаційних двигунів. У таких машинах багато вузлів, зокрема підшипники, є недоступними для прямого вимірювання високочастотної вібрації, що ускладнює виявлення початкових стадій багатьох дефектів.

Однак зазначені труднощі не є суттєвою перепоною для розвитку вібраційної діагностики таких об'єктів. Щоб підвищити інформативність сигналів вібрації, необхідно впроваджувати більш складні методи їх аналізу. Підтвердженням правильності цього підходу є той факт, що вже тривалий час фахівці-діагности для якісного аналізу складних вібраційних сигналів у звуковому діапазоні використовують органи слуху. Завдяки цьому можна виявляти навіть слабкі імпульсні компоненти ударного характеру на фоні потужних стаціонарних складових.

Значні перспективи у кількісному аналізі складних вібраційних сигналів з імпульсними елементами відкриває застосування методів вейвлет-аналізу. Також важливим напрямом розвитку вібраційної діагностики є автоматизація обробки результатів традиційних методів, зокрема спектрального аналізу вібрацій у широкому частотному діапазоні з високою частотною роздільністю.

Вібрація машин і обладнання має, як правило, складну структуру і складається з детермінованих і випадкових компонентів різної форми. Найпростішим видом аналізу вібрації за часом є визначення форми окремих компонентів сигналу вібрації, котрі або значно перевищують за величиною інші компоненти, або попередньо виділяються із сигналу вібрації.

Найпростішим детермінованим сигналом вібрації (або його компонентою) є гармонійний сигнал, який показано на (рис.2, а):

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \tag{1}$$

де $x(t)$ — поточне значення сигналу в момент часу t;

A_0 — амплітуда сигналу;

ω_0 — кругова частота сигналу;

φ_0 — початкова фаза сигналу.

Кожен із вказаних трьох параметрів гармонійної вібрації, що визначає її форму, може нести в собі діагностичну інформацію. Виняток складає лише початкова фаза.

Період гармонічної вібрації пов'язаний з круговою частотою і дорівнює $T_0 = 2\pi/\omega_0$. Аналогічний період може бути і у більш складної, полігармонічної вібрації, яка містить ряд кратних за частотою ω_0 гармонійних складових. Приклади такої вібрації так само наведені на (рис.2).

Якщо сигнал вібрації мало відрізняється від гармонійного (рис.2,б) і в його складі лише кілька гармонік, то діагностична інформація може міститися в розглянутих раніше параметрах кожної з цих гармонік.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k (\cos k\omega_0 t + \varphi_k). \tag{2}$$

Якщо тривалість сигналу мала в порівнянні з періодом його прямування, як це показано на (рис.2,в), то інформація частіше за все міститься в інших параметрах сигналу, таких, як амплітуда (розмах), частота прямування (період T_0), шпаруватість (відношення тривалості сигналу до періоду прямування), час наростання τ_1 і час спаду τ_2.

Рис. 2. Періодичний сигнал вібрації різної форми [7]

Окрім детермінованих складових вібрації машин і обладнання містить ще й випадкові складові.

На відміну від детермінованих сигналів у випадкових сигналах не можуть бути визначені ні амплітуда, ні частота, ні фаза. Фізичними параметрами випадкової вібрації є потужність і ефективна ширина полоси частот, в якій сконцентрована велика частина (більш ніж 70%) її потужності. Якщо діапазон частот, який займає сигнал вібрації, виявляється великим і потужність сигналу розподілена по частотам нерівномірно, додаткову інформацію може дати форма розподілення спектральної щільності сигналу по частоті. А для того, щоб одиниця виміру детермінованої і випадкової вібрації збігалися, замість потужності випадкового сигналу для її опису використовується параметр, що є квадратним коренем з потужності і називається середньоквадратичним значенням (відхиленням) сигналу вібрації (СКЗ).

Конкретне значення миттєвого зміщення, швидкості або прискорення випадкової вібрації задається його щільністю ймовірності. В більшості випадків закон розподілення щільності ймовірності цих значень є нормальним, що описується виразом

$$p(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} exp\left(-\frac{[x(t)-\bar{x}(t)]^2}{2\sigma_x^2}\right), \tag{3}$$

де $p[x(t)]$ – ймовірність того, що в момент t сигнал вібрації має значення x;

σ_x - СКЗ сигналу вібрації;

$\bar{x}(t)$ – середнє значення сигналу вібрації, який зазвичай дорівнює нулю.

В цьому випадку потужність випадкового сигналу вібрації визначається величиною

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt, \tag{4}$$

де T – інтервал, на якому визначається потужність сигналу.

Якщо випадкова вібрація стаціонарна, тобто її потужність в часі стала, середньоквадратичне значення σ_x сигналу вібрації визначається на будь-якому відрізку часу, який більший за мінімальний.

Статистичні методи аналізу вібрацій, що реєструються в певній точці машини або обладнання, застосовуються в тих випадках, коли неможливо з достатньою точністю визначати значення вібраційного сигналу $x(t)$ у будь-який момент часу t, або встановити чітку залежність між його значеннями, що відрізняються на певний часовий інтервал Δt.

У практичній діагностиці зазвичай використовують лише окремі базові методи одномірного статистичного аналізу вібраційного сигналу або його окремих параметрів.

Один із таких методів передбачає кількісну оцінку відмінностей між параметрами фактичного розподілу щільності ймовірності $p(x)$ сигналу $x(t)$ чи його виокремлених компонентів і параметрами нормального (гаусового) розподілу [8].

Інший підхід полягає у визначенні граничних значень вибраних параметрів вібрації, які дозволяють класифікувати об'єкти контролю на групи з різними характеристиками на основі результатів періодичних вимірювань.

Третій метод базується на кількісному оцінюванні змін параметрів вібрації в часі, тобто передбачає побудову відповідних трендів для відстеження динаміки цих змін.

Ще одним методом статистичного аналізу є встановлення взаємозв'язків між різними параметрами одного й того самого вібраційного сигналу.

Щільність ймовірності значень сигналу $x(t)$ повинна задовольняти умову нормування.

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1. \tag{5}$$

Як правило, вібраційний сигнал має симетричне відносно положення рівноваги розподілення значень, однак сама функція розподілу ймовірності $p(x)$ може мати різну форму.

У вібраційній діагностиці однією з важливих задач є кількісне оцінювання відхилень реального розподілу $p(x)$ від нормального закону.

Така оцінка зазвичай виконується на основі аналізу чотирьох ключових параметрів розподілу $p(x)$: першого початкового моменту (середнього значення), а також другого, третього і четвертого центральних моментів.

Середнє значення сигналу $x(t)$ визначається наступним інтегральним виразом:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)p(x)dx. \tag{6}$$

Оскільки середнє значення $\bar{x}$ зазвичай обчислюється на основі скінченої вибірки з N вимірних значень сигналу $x(t)$, його вибіркова оцінка має вигляд:

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x(t_i). \tag{7}$$

Другий центральний момент розподілу $p(x)$, тобто дисперсія σ_x^2 визначається таким чином:

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} p(x)(x - x)^2\, dx. \tag{8}$$

У випадку використання вибірки з N значень $x(t)$, та за умови, що $\bar{x} = 0$, дисперсія оцінюється за формулою:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} x_i^2. \tag{9}$$

Дисперсія σ_x^2 дозволяє кількісно оцінити потужність змінної складової вібраційного сигналу. Водночас, на практиці частіше використовується середньоквадратичне значення сигналу σ_x, яке для гармонічного сигналу з амплітудою A_0 становить $A_0/\sqrt{2}$.

Крім того, середньоквадратичне значення використовується для оцінювання статистичної похибки середнього значення сигналу, визначеного за N незалежними вимірюваннями $x(t)$. З довірчою ймовірністю 95% ця похибка становить $2\sigma_x/\sqrt{N}$.

Центральні моменти вищих порядків, починаючи з третього, застосовуються для оцінки ступеня відхилення реального розподілу $p(x)$ від нормального – як для повного вібраційного сигналу, так і для окремих його компонент, наприклад, високочастотних. Для цього використовуються нормовані значення третього σ_x^3 та четвертого σ_x^4 моментів – так звані коефіцієнти асиметрії та ексцесу:

$$\gamma_x = \frac{1}{(N-2)\sigma_x^3}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^3; \tag{10}$$

$$\eta_x = \frac{1}{(N-3)\sigma_x^4}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x)^4. \qquad (11)$$

Коефіцієнт асиметрії γ_x для більшості об'єктів зазвичай близький до нуля за умови лінійності вимірювального обладнання, адже він характеризує ступінь симетрії розподілу $p(x)$ відносно середнього значення.

Коефіцієнт ексцесу η_x відображає, наскільки форма розподілу $p(x)$ відхиляється від нормального, маючи при цьому ту саму величину середньоквадратичного значення σ_x.

Наступною задачею аналізу є визначення порогів зони допустимих значень параметрів, що вимірюються, наприклад $\zeta(t)$. Якщо кількість незалежних вимірювань параметра, що входять у вибірку, яку використовують для визначення порогів, достатньо велика ($N \geq 30$), то пороги визначаються достатньо просто. Для цього необхідно лише задати ймовірність p того, що $\zeta(t)$ виявиться вище за величини порога $\zeta_{пор}$ у відповідності з виразом

$$p\{\zeta(t) > \zeta_{пор}\} = \frac{1}{\sigma_\zeta}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\int_{\zeta_{пор}}^{\infty} e^{\frac{\zeta^2}{2\sigma_\zeta^2}} d\zeta. \qquad (12)$$

Так, для $p\{\zeta(t) > \zeta_{пор}\} = 0{,}05$

$$\zeta_{пор} \approx \bar{\zeta} + 2\sigma_\zeta,$$

а, для $p\{\zeta(t) > \zeta_{пор}\} = 0{,}005$

$$\zeta_{пор} \approx \bar{\zeta} + 3\sigma_\zeta.$$

В умовах малої кількості незалежних вимірювань в задачі визначення порогових значень необхідно додатково врахувати той факт, що оцінка СКВ, яку ми отримуємо, також є випадковою величиною і підпорядковується розподілу x^2 із N ступенями свободи, де N – число незалежних вимірювань $\zeta(t)$, що використовуються для вибіркової оцінки $\bar{\zeta}(t)$ і σ_ζ. СКВ – середньоквадратичне відхилення.

При статистичному аналізі діагностичних параметрів у практичних задачах необхідно виконувати ряд умов.

Перша умова – оптимальний вибір інтервалів і мінімальної кількості вимірювань. Як правило, достовірну оцінку параметрів вібрації машин і обладнання можна отримати лише за тривалий час безперебійної роботи, зі зміною режимів роботи в дозволених межах і при різних зовнішніх умовах.

Друга умова пов'язана з можливою появою випадкових (помилкових) вимірювань у вибірці, яка використовується для статистичного аналізу.

Третя умова – необхідність перевірки даних періодичних вимірювань діагностичних параметрів на предмет виявлення їхніх монотонних змін (трендів), які можуть з'являтися після ремонту (обслуговування) обладнання і по мірі зносу чи розвитку можливих дефектів.

Четверта умова – необхідність звуження зони природних флуктуацій діагностичних параметрів за відсутності дефектів у обладнанні, яке контролюється.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження встановлено, що ефективна діагностика технічного стану електромеханічного обладнання значною мірою залежить від здатності системи розпізнавати та аналізувати віброакустичні сигнали різної природи – періодичні, випадкові та імпульсні. Розділення цих компонентів є необхідною умовою для підвищення достовірності діагностичних рішень. Традиційні методи спектрального аналізу демонструють високу ефективність при роботі з низькочастотними сигналами роторного обладнання, однак у випадку складніших систем, таких як поршневі машини, їх інформативність суттєво знижується. Для таких ситуацій доцільним є використання альтернативних підходів, зокрема методу ударних імпульсів (SPM) та методу акустичної емісії.

Складність аналізу вібрацій зростає в середньочастотному діапазоні, де періодичні, випадкові та ударні компоненти мають порівняну інтенсивність, а коливальні системи характеризуються багатьма резонансами і високою добротністю. У таких умовах необхідно застосовувати складніші методи обробки сигналів, включаючи адаптивні та статистичні. Обґрунтовано доцільність використання середньоквадратичного значення, коефіцієнта асиметрії та ексцесу, а також тренд-аналізу для моніторингу технічного стану. Перспективним є також застосування вейвлет-аналізу та сучасних цифрових алгоритмів обробки сигналів, що дозволяє істотно підвищити інформативність діагностичних ознак, особливо в умовах складної резонансної структури або обмеженого доступу до окремих вузлів. Отримані результати можуть бути використані при розробці автоматизованих систем технічного діагностування та впровадженні обслуговування обладнання за фактичним станом.

Список бібліографічного опису

1. Bently D. E., Hatch C. T., Grissom B. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. New York: ASME Press, 2002. 614 p.
2. Perez R. X. Condition Monitoring: Tribotechnology and Reliability in Rotating Machinery. Weinheim: Wiley-VCH, 2023. 432 p.
3. Gangsh R. Gas Turbine Diagnostics: Signal Processing and Fault Isolation. Boca Raton: CRC Press, 2013. 254 p.
4. Sahoo S., Dash P. Higher-Order Spectral Analysis and Artificial Intelligence for Diagnosing Faults in Electrical Machines: An Overview. Mathematics, 12(24), Article 4032. 2024. DOI: 10.3390/math12244032
5. Liu H., Zhang J., Wang Y. Review of Spectrum Analysis in Fault Diagnosis for Mechanical Equipment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1342(1), 2025. DOI: 10.1088/2631-8695/ac1ae2
6. Кульки підшипників в електродвигунах. 2024. URL: http://www.tandi.com.ua/articles/139/ (дата звернення: 29.04.2025)
7. Weisstein T. LibreTexts Physics. 2024. URL: https://phys.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis (дата звернення: 28.04.2025).
8. Дяченко І.О. Методи і моделі упорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів: монографія / Галина Олексіївна Дяченко. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2020. 176 с.

References:

1. Bently D. E., Hatch C. T., Grissom B. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. New York: ASME Press, 2002. 614 p.
2. Perez R. X. Condition Monitoring: Tribotechnology and Reliability in Rotating Machinery. Weinheim: Wiley-VCH, 2023. 432 p.
3. Gangsh R. Gas Turbine Diagnostics: Signal Processing and Fault Isolation. Boca Raton: CRC Press, 2013. 254 p.
4. Sahoo S., Dash P. Higher-Order Spectral Analysis and Artificial Intelligence for Diagnosing Faults in Electrical Machines: An Overview. Mathematics, 12(24), Article 4032. 2024. DOI: 10.3390/math12244032
5. Liu H., Zhang J., Wang Y. Review of Spectrum Analysis in Fault Diagnosis for Mechanical Equipment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1342(1), 2025. DOI: 10.1088/2631-8695/ac1ae2
6. Ball bearings in electric motors. 2024. URL: http://www.tandi.com.ua/articles/139/ (access date: 29.04.2025)
7. Weisstein T. LibreTexts Physics. 2024. URL: https://phys.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis (access date: 28.04.2025).
8. Дяченко І.О. Методи і моделі впорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів: монографія [Methods and models for ordering experimental information for identifying and predicting the state of continuous processes]. Kherson: Publishing house FOP Vyshemirsky V.S., 2020. 176 p. [in Ukrainian].

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-37
УДК 621.396.96
Якимчук Наталія Миколаївна, к.т.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-8173-449X
Ткачук Валентина Вікторівна, начальник науково-дослідної частини
https://orcid.org/0000-0003-3296-3111
Релька Олексій Ярославович, студент
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ЧАСТОТНОГО ПЛАНУВАННЯ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ FMCW-РАДАРНИХ МЕРЕЖАХ З УРАХУВАННЯМ КОНФЛІКТНОСТІ КАНАЛІВ

Якимчук Н. М., Ткачук В. В., Релька О. Я. Модель адаптивного частотного планування в децентралізованих FMCW-радарних мережах з урахуванням конфліктності каналів. У статті розглянуто задачу безконфліктного частотного планування в багатокористувацьких FMCW-радарах з урахуванням взаємних перешкод між сигналами. Запропоновано аналітичні умови для уникнення перекриття чирп-сигналів у частотно-часовому просторі та сформульовано оптимізаційну задачу мінімізації зайнятого спектра з урахуванням обмежень на допустимі частоти та часові слоти передачі. Основну увагу приділено моделюванню частотного нахилу як ключового параметра, що визначає рівень взаємних інтерференцій. Вперше запропоновано підхід із використанням вагової функції пріоритетності частот, що дозволяє адаптувати розподіл спектру під поточні умови навантаження, типи сигналів або зовнішні обмеження. Розроблено модель цільової функції з багатокритеріальною оптимізацією, яка одночасно враховує бажаність частоти, ступінь конфлікту та точність розташування в спектрі. Обґрунтовано доцільність застосування спектрального моніторингу та локальних рішень для децентралізованих систем. Цей підхід відкриває шлях до побудови більш інтелектуальних і самоконфігурованих FMCW-систем, здатних адаптуватися до змін у середовищі без потреби в централізованому координуванні. Отримані результати можуть бути використані для побудови адаптивних алгоритмів планування в автономних транспортних системах, інтелектуальних сенсорних мережах та когнітивних радіосистемах нового покоління.
Ключові слова: FMCW-радар, частотне планування, інтерференція, спектральний моніторинг, адаптивний алгоритм.

Yakymchuk N., Tkachuk V., Relka O. Adaptive Frequency Planning Model in Decentralized FMCW Radar Networks with Channel Conflict Awareness. The article addresses the problem of interference-free frequency planning in multi-user FMCW radars, taking into account mutual interference between signals. Analytical conditions are proposed to prevent the overlapping of chirp signals in the time-frequency domain, and an optimization problem is formulated to minimize the occupied spectrum under constraints on allowable frequencies and transmission time slots. Particular attention is given to modeling the chirp frequency slope as a key parameter that determines the level of mutual interference. For the first time, a priority-weighted frequency function approach is proposed, allowing adaptive spectrum allocation based on current traffic conditions, signal types, or external constraints. A multi-objective optimization model for the cost function is developed, simultaneously considering frequency preference, conflict level, and spectral accuracy. The study justifies the use of spectral monitoring and local decision-making for decentralized systems. This approach paves the way for the development of more intelligent and self-configuring FMCW systems capable of adapting to environmental changes without centralized coordination. The obtained results can be applied to develop adaptive planning algorithms in autonomous transport systems, intelligent sensor networks, and next-generation cognitive radio systems.
Keywords: FMCW radar, frequency planning, interference, spectral monitoring, adaptive.

Постановка наукової проблеми. Зі зростанням популярності FMCW-радарів у транспортній галузі, системах безпеки, робототехніці та промисловій автоматизації, актуалізується проблема їх взаємного впливу в умовах високої щільності розміщення пристроїв. У середовищах, де одночасно функціонує багато радарних систем, частотне перекриття та завади між сигналами різних пристроїв стають основним джерелом похибок у вимірюваннях, зниження точності, а іноді й повної втрати функціональності. Оскільки доступні радіочастотні ресурси обмежені, особливо в діапазонах, дозволених для безліцензійного використання, постає завдання оптимізації використання спектра. Частотне планування забезпечує ефективний розподіл цього ресурсу між численними пристроями без шкоди для точності вимірювань.

Розробка ефективних методів частотного планування дає змогу вирішити одразу кілька критичних проблем. Передусім, це мінімізація взаємної інтерференції між радарами шляхом уникнення накладання переданих і прийнятих сигналів у частотно-часовому просторі. Таке планування дозволяє зберегти стабільність роботи навіть за умов динамічного змінення кількості активних пристроїв, що особливо актуально для автономного транспорту та мобільних сенсорних систем.

Крім того, ускладнення структури мультисенсорних систем, які поєднують радар, лідар і відеоаналітику, вимагає від радарів підвищеної надійності та передбачуваності. Це можливо лише

за умови стабільної роботи без впливу зовнішніх радарних сигналів. Частотне планування також сприяє зменшенню обчислювального навантаження на системи цифрової обробки сигналів, що позитивно впливає на енергоефективність та час реакції пристроїв

Таким чином, дослідження у сфері частотного планування в FMCW-радарних системах є надзвичайно актуальним з огляду на технічні виклики, що виникають у наслідок масштабування радарних мереж, зростання вимог до точності та зменшення спектральних ресурсів. Розв'язання цього завдання є ключовим для надійної та безпечної роботи радарних технологій нового покоління.

Аналіз досліджень. Сучасні радіолокаційні системи з частотно-модульованим безперервним сигналом (FMCW) відіграють ключову роль у широкому спектрі застосувань — від автомобільної безпеки до автономної навігації, промислової автоматизації та безконтактного моніторингу. Висока точність визначення відстані та швидкості об'єктів, компактність реалізації та енергоефективність роблять FMCW-технологію особливо привабливою для впровадження у високодинамічні середовища. Однак зі зростанням кількості таких систем, зокрема в умовах щільного розміщення – наприклад, в автопарках, на перехрестях чи в промислових кластерах – зростає ризик взаємного впливу радарів один на одного.

Технологія FMCW-радарів (Frequency-Modulated Continuous Wave) є однією з ключових у сучасних сенсорних системах, що застосовуються в автомобільній промисловості, робототехніці, безпілотних платформах та індустрії 4.0. Класичні аспекти функціонування таких радарів, включно з генерацією чірп-сигналів, принципом гетеродинного прийому та обробкою відбитого сигналу, докладно описані у фундаментальних працях [1] та [2]. У цих джерелах визначено базові характеристики FMCW-систем і технічні переваги використання міліметрового діапазону (особливо 76–81 ГГц) у компактних сенсорах високої точності.

Однією з критичних проблем, що описані в актуальних дослідженнях, є забезпечення ефективного частотного планування. Обмеженість доступного спектра, а також необхідність запобігання інтерференції між окремими радарами ставлять нові виклики перед розробниками апаратного забезпечення й алгоритмів керування сигналами. У роботі [3] запропоновано методи мінімізації завад шляхом зміщення частот переданих сигналів, а також проаналізовано ефективність частотного рознесення у типових сценаріях міського середовища. Додатково, у роботі [4] наведено огляд методів цифрової обробки сигналів, які можуть частково компенсувати вплив інтерференції. Нарешті, в [5] представлено схему координованої передачі FMCW-сигналів на основі часово-частотного планування для автотранспортних систем, що дозволяє уникати колізій без централізованого керування. У загальному оглядовому дослідженні [6] підсумовуються актуальні аспекти техніки обробки сигналів автомобільних радарів, включаючи дизайн сигналу, алгоритми оцінки та компроміс між складністю та роздільною здатністю реалізації для складних середовищ, а також унікальні проблеми, пов'язані з автомобільними радарами, наприклад виявлення пішоходів. Проте автори підкреслюють, що пріоритет має запобігання завадам ще на етапі планування сигналу, що підтверджує доцільність дослідження частотного розподілу як базової стратегії.

Суміжні напрями також включають застосування адаптивного управління і роботи нейромереж у багатарадарних системах. У дослідженні [7] розроблено адаптивний алгоритм частотного планування, який реагує на зміну щільності розміщення радарів, забезпечуючи ефективний розподіл спектра за умов обмеженого ресурсу. Особливої уваги заслуговує робота [8], де застосовано алгоритми глибокого навчання з підкріпленням для динамічного керування частотами в умовах високої мобільності. Огляд [9] демонструє потенціал машинного навчання у задачах динамічного розподілу частот, зокрема для адаптації до змін навколишнього середовища без потреби в попередньому моделюванні. Цей підхід демонструє потенціал інтеграції штучного інтелекту в системи частотного керування FMCW-радарами.

Таким чином, сучасна наукова думка визнає частотне планування як ключовий елемент забезпечення надійної, масштабованої та безперешкодної роботи FMCW-радарів. Попри існування низки ефективних рішень, актуальним залишається пошук нових стратегій, здатних працювати в умовах невизначеності, без централізованої синхронізації, та з мінімальним енергоспоживанням. У неконтрольованих або динамічних середовищах, де відсутня централізована координація між пристроями, особливу актуальність набувають адаптивні стратегії частотного планування та розподілу спектра.

Метою дослідження є розробка підходу до частотного планування в FMCW-радарних системах, який дозволяє зменшити рівень взаємної інтерференції між радарами, забезпечити ефективне використання обмеженого частотного ресурсу та зберегти стабільність роботи системи у

динамічному багатокористувацькому середовищі. Запропонований підхід орієнтовано на автономне функціонування радарних пристроїв без потреби в централізованій координації, що робить його перспективним для застосування в транспортних, побутових і промислових умовах.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

У типовій FMCW-радарній системі передавальний сигнал являє собою чірп, тобто сигнал з лінійною частотною модуляцією. Його миттєва частота описується як [1]:

$$f_{TX}(t) = f_c + \mu t,\ 0 \le t \le T_c \qquad (1)$$

де f_c – початкова (центральна) частота чірпу;

$\mu = B/T_c$ – крутизна чірпу (швидкість зміни частоти);

B – ширина смуги частот чірпу;

T_c – тривалість одного чірпу.

У системах FMCW-радарів відстань до об'єкта визначається шляхом порівняння переданого й прийнятого сигналів, частотна різниця між якими прямо залежить від часу затримки – тобто віддаленості об'єкта. Радар формує лінійно зростаючий або спадний чірп-сигнал, що відбивається від цілі та надходить назад до приймача. Цей сигнал змішується з власним переданим чірпом, внаслідок чого утворюється сигнал проміжної частоти ПЧ, який несе інформацію про дальність та швидкість об'єкта.

Однак у реальних умовах навколишнього середовища часто одночасно працює кілька радарів, і в таких випадках виникає явище міжрадарної інтерференції. Проблема, зображена на рисунку 1, ілюструє критичний випадок інтерференції між двома FMCW-радарами, коли сигнали агресора та жертви мають однаковий нахил чірпів та перекриваються в часі. У такій ситуації приймач жертви сприймає інтерференційний сигнал від агресора як відбитий сигнал від реальної цілі. Після змішування з власним переданим сигналом, цей сторонній сигнал утворює стабільну синусоїду на виході аналого-цифрового перетворювача, яку система обробки інтерпретує як наявність об'єкта. В результаті виникає так званий «фантомний» об'єкт, або «ghost target», який не має фізичного джерела у просторі, однак повністю імітує справжню ціль за характеристиками. Це призводить до хибних рішень у навігації, керуванні чи виявленні, що особливо небезпечно в умовах високої щільності трафіку, наприклад, у системах допомоги водієві або автоматизованого керування. Подібна ситуація підкреслює важливість надійного частотного планування та координації параметрів чірп-сигналів для уникнення конфліктів між радарами, що працюють у спільному середовищі.

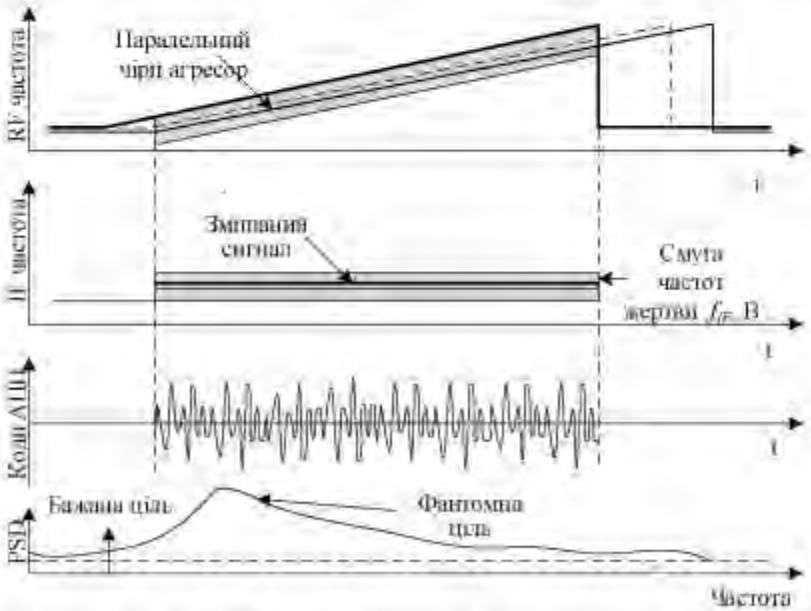


Рис. 1 – Інтерференція між двома FMCW-радарами, при накладанні сигналів з паралельними чірпами

Для N незалежних радарів, які функціонують у спільному середовищі, виникає необхідність координувати частотні параметри кожного з них, щоб уникнути перекриття їх сигналів у частотно-часовому просторі.

Нехай для кожного радара i задається власна пара параметрів (f_{c_i}, t_{0_i}), де f_{c_i} – початкова частота чірпу радара i, t_{0_i} – момент початку передавання чірпу.

Умова беззаводного частотного планування між будь-якими двома радарами i та j формулюється як [1, 6]:

$$\left|f_{c_i} - f_{c_j}\right| + \left|\mu\left(t_{0_i} - t_{0_j}\right)\right| \geq B, \forall i \neq j. \tag{2}$$

Ця умова гарантує, що передані чірпи не накладатимуться один на одного у просторі частота-час.

Загальна задача оптимального частотного планування може бути сформульована як задача мінімізації загальної ширини зайнятого спектру

$$min_{f_{c_1},\ldots,f_{c_N},t_{0_1},\ldots,t_{0_N}}\left(\max_i f_{c_i} + \mu T_c - \min_i f_{c_i}\right). \tag{3}$$

за умови виконання наведеного вище критерію розділення для всіх пар i, j.

Задача ускладнюється, якщо частотний діапазон обмежений, наприклад:

$$f_{min} \leq f_{c_i} \leq f_{max} - \mu T_c \tag{4}$$

де f_{min} і f_{max} – межі допустимого спектру.

Чірп-сигнал у FMCW-радарах має лінійно змінну частоту, і його нахил (градієнт частоти) впливає на взаємні перешкоди між сигналами від різних користувачів. Градієнт частоти чірпа оцінюється за формулою:

$$k = \frac{\Delta f}{T_k} \tag{5}$$

де Δf – зміна частоти чірпа на проміжку часу T_k.

Взаємні перешкоди в багатокористувацькому FMCW-радарі виникають через накладання сигналів із різними нахилами, зокрема чим крутіший нахил (або вищий градієнт частоти k), тим менше часове перекривання між сигналами різних користувачів, а отже і зменшуються взаємні інтерференції сигналів.

Якщо два користувачі використовують чірп-сигнали з різними нахилами k_1 і k_2, їхні спектри можуть частково перекриватися, створюючи інтерференцію. Частотна різниця між двома сигналами в момент часу t визначається як:

$$\Delta f_{12}(t) = |(k_1 - k_2)t| \tag{6}$$

Чим менше значення $|k_1 - k_2|$, тим більший час перекривання між сигналами по частоті, що підвищує рівень взаємних перешкод. При дуже малих градієнтах частоти k сигнали користувачів можуть накладатися в частотній області, що призводить до збільшення взаємних перешкод.

Рівень взаємних перешкод визначається виразом:

$$I = \int |S_1(f)S_2(f)|df \tag{7}$$

де $S_1(f)$ та $S_2(f)$ – спектри сигналів різних користувачів.

Отже, оптимальний нахил чірпа вибирається так, щоб мінімізувати перекривання сигналів в частотному домені між різними користувачами. Щоб мінімізувати взаємні перешкоди, можна

використовувати ортогональні нахили чірп-сигналів, при якому сигнали різних радарів мають нахили, які мінімально корелюють між собою. Для сигналів із різними нахилами це досягається, коли:

$$|k_1 - k_2| \gg \frac{B}{T_c} = \mu \tag{8}$$

Тобто різниця нахилів повинна бути достатньо великою, щоб уникнути перекриття частотних діапазонів. Крім того, слід уникати великого рознесення частотних градієнтів, щоб уникнути великої різниці в часових затримках і можливості розходження сигналів у приймальнику.

Навіть якщо два користувачі мають однакові або близькі нахили, але їхні сигнали не передаються одночасно, вони не створюють взаємних перешкод [3]. Кожен користувач має часовий слот $T_i \subseteq [0, T_{frame}]$ і перешкоди виникають лише при перетині часових вікон, тобто $T_i \cap T_j = \emptyset \Rightarrow$ перевіряємо $|k_i - k_j| \geq \Delta k_{min}$.

Якщо часові вікна ортогональні (не перетинаються), допустимий навіть ідентичний нахил. Тоді, оптимальний нахил k_{opt} можна оцінити як [3].

$$k_{opt} = \Delta f_{max}/T, \text{ при } T_i \cap T_j = \emptyset \tag{9}$$

де Δf_{max} – максимальна допустима різниця частот між користувачами.

На графіку зображено розподіл ортогональних нахилів чірп-сигналів між кількома радарами (користувачами). Кожному користувачу присвоєно унікальний нахил з урахуванням мінімального розриву $\Delta k = 0{,}3 \cdot 10^{12}$ Гц/с, що забезпечує взаємну ортогональність сигналів. Такий підхід демонструє концепцію широчного квантування нахилів, де користувачі займають неконфліктні частотні канали у просторі нахилів.

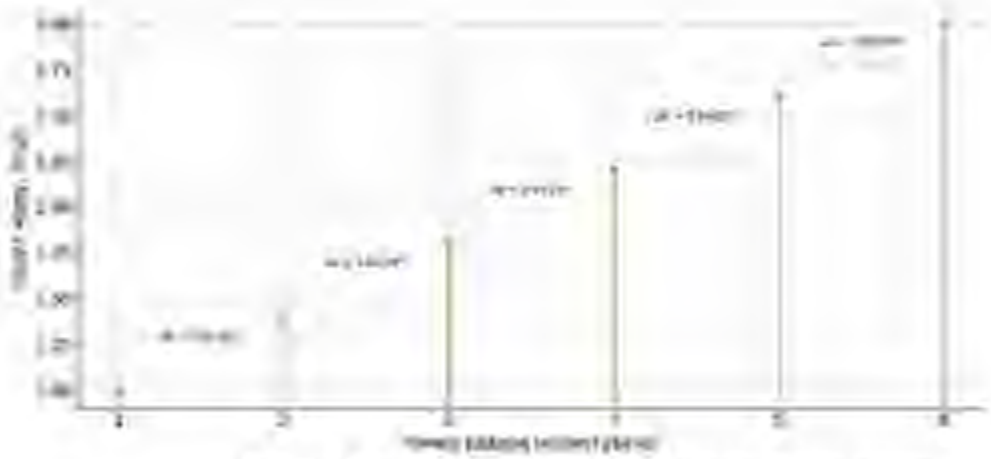


Рис. 2 – Розподіл ортогональних нахилів між радарами

У багатокористувацьких FMCW-радарах, особливо в мобільних системах (автомобілі, дрони, БПЛА) або в інфраструктурах з динамічно змінною завантаженістю (смарт-міста, кооперативні мережі), набір активних радарів постійно змінюється. Узгодження ортогональних нахилів потребує централізованого або узгодженого розподілу частотних нахилів k_i, знання конфігурації всіх активних радарів, високої точності синхронізації у часі та частоті. У реальному часі це майже недосяжно без складного обміну службовими повідомленнями, що створює затримки, навантаження на канал зв'язку, і ризики конфлікту при одночасному доступі до спектру.

Для роботи у децентралізованому середовищі, кращу ефективність прийняття локальних рішень можна отримати за допомогою спектрального моніторингу [2]. Типовий алгоритм роботи наступний: новий користувач вимірює передачу з нахилом k_i. Система перевіряє, чи знаходиться він на відстані Δk_{min} від усіх існуючих. Якщо є конфлікт (нахил занадто близький до хоча б одного k_j),

тоді система або центр координації виконує пошук найближчого вільного нахилу $k_в$, який задовольняє нерівність $\forall i: |\ k_в - k_i\ | \geq \Delta k_{min}$.

Новому користувачу призначається $k_в$. Якщо вільних нахилів немає – система може запропонувати дзеркальний чірп (спектральне віддзеркалення, тобто зміна знаку нахилу з $+k$ на $-k$), що також забезпечує ортогональність.

В реальних застосуваннях використання рівномірного розподілу коефіцієнтів обмежує ефективність використання частотного ресурсу. Деякі частоти можуть бути більш важливими для певних користувачів через технічні обмеження або переваги, зокрема схильність до перешкод. У випадку, коли є кілька можливих частот для вибору, пріоритет може бути відданий тим частотам, де менше перешкод від інших користувачів або де частотні ресурси розподілені більш рівномірно. Деякі частоти можуть вимагати менших енергетичних витрат для досягнення необхідної потужності сигналу. У цьому випадку система повинна надавати пріоритет вибору таких частот для максимального збереження енергії. Слід додатково враховувати, що у великих телекомунікаційних системах може бути обмеження на використання деяких частотних ділянок, наприклад, через ліцензування або зовнішні обмеження.

Розширимо попередню модель введенням ваг для пріоритетних частот, щоб при виборі $k_в$ враховувався не лише відступ від інших користувачів, а й бажаність певних нахилів через функцію ваг $\omega(k)$

Тобто, для кожного можливого k у спектрі обчислюємо не лише відстань до вже зайнятих частот, а й «вагу» цього вибору в залежності від пріоритетності ділянки частот:

$$J(k) = \alpha\ |k\ -\ k_к| - \beta \cdot \omega(k), \tag{10}$$

де α – коефіцієнт, що визначає важливість мінімізації відстані до бажаного значення $k_н$,

β – коефіцієнт, що визначає важливість ваги для вибору частоти.

$\omega(k)$ – функція ваги для частоти k, що може бути задана у вигляді гаусової функції для пріоритетних частот, дійсною оцінкою якості частоти, наприклад, залежно від впливу перешкод або ефективності радіопередачі на різних частотах.

Розглянемо сценарії, оптимального використання ваги для частот.

1) У системах, де деякі частоти використовуються для передачі критичної інформації, наприклад, для безпеки або контролю, для таких частот може бути введена більша вага $\omega(k)$. Наприклад:

$$\omega(k) = exp\left(-\frac{(k - k_к)^2}{2\sigma^2}\right), \tag{11}$$

Тут $k_к$ – це критична частота, на якій здійснюється передача важливих даних, а σ – ширина пріоритетної зони. Це означає, що частоти, близькі до $k_к$, будуть мати вищу пріоритетність.

2) Якщо система використовує різні частоти для різних типів сигналів (наприклад, для передачі даних або для зв'язку в умовах низького сигналу), для кожної з цих частот може бути введена специфічна вага в залежності від її ефективності. Наприклад:

$$\omega(k) = \begin{cases} 1, & \text{для частот, де ефективність висока,} \\ 0.5, & \text{для частот, де ефективність низька.} \end{cases} \tag{12}$$

3) Якщо система вже інтенсивно використовує певні частоти, але деякі ділянки спектра менш навантажені іншими користувачами, для таких частот можна ввести вищу вагу. Це дозволить системі вибрати ці частоти з більшими шансами, навіть якщо відстань до інших користувачів трохи менша.

В такому випадку цільова функція оптимізації є мінімумом об'єднаної функції втрат:

$$J(k, s, T) = \alpha \cdot |k\ -\ k_б| - \beta \cdot \omega(k) + \gamma \cdot C(k, s, T), \tag{13}$$

де $C(k, s, T) = \sum_i \left[(T \cap T_i \neq \emptyset) \wedge D\big((k, s), (k_i, s_i)\big) < \Delta k_{min} \right]$ – функція конфлікту з іншими користувачами.

$\|\cdot\|$ – індикатор: 1, якщо умова виконується, інакше 0,

α, β, γ – параметри визначають вагу точності, бажаності та конфліктності відповідно.

Параметр конфліктності γ вказує на ступінь пріоритету уникнення інтерференції у процесі вибору параметрів FMCW-сигналу. Він визначає, наскільки сильно система штрафує такі частотно-часові положення (k, l), які можуть спричинити накладання з іншими радарами. Таким чином, збільшення γ призводить до вибору більш «обережних», хоча й можливо менш ефективних у сенсі ресурсу, рішень, що знижують ймовірність появи фантомних цілей або шуму.

Для оцінки ефективності цільової функції було проведено моделювання на обмеженому частотному діапазоні, який умовно поділявся на двадцять дискретних каналів. Центральним бажаним каналом обрано канал із номером десять, навколо якого здійснювалось частотне планування. При моделюванні було враховано розподіл бажаності каналів у спектрі: зокрема, вважалося, що ділянки в межах п'ятого–восьмого та п'ятнадцятого–вісімнадцятого каналів є менш навантаженими та, відповідно, мають вищу бажаність для використання.

Для опису спектрального середовища в моделі передбачено наявність п'яти активних користувачів, які вже займають певні частотні канали, що наближені до 3-го, 7-го, 10-го, 12-го та 17-го каналів. Введено обмеження у вигляді мінімальної допустимої відстані між частотами активних користувачів та потенційно вибраним каналом, яка фіксована на рівні двох каналів. Це дозволило сформувати конфліктну функцію, що оцінює кількість випадків небажаного перекриття у частотній області.

Моделювання виконувалося для трьох варіантів вагових коефіцієнтів, які регулювали вплив відповідно точності розміщення, бажаності частоти та кількості конфліктів з іншими користувачами. Усі розрахунки проводилися у вигляді тривимірних реалізацій функції втрат для кожного з варіантів параметризації, що дозволило візуалізувати зміни профілю цільової функції та зробити висновки щодо впливу кожного з факторів на результат частотного планування.

Графіки, отримані для трьох варіантів параметризації функції (рис. 3), демонструють суттєву зміну профілю цільових значень у залежності від ваги кожного із трьох факторів. У випадку рівномірного врахування всіх компонентів (α=1, β=1, γ=1), функція виявляє помірну реакцію як на віддалення від бажаного частотного центру, так і на ступінь завантаженості каналу та можливість конфліктів. Така конфігурація забезпечує збалансоване рішення, однак може призводити до вибору частот із незначними конфліктами, якщо вони є географічно чи часово ближчими до бажаного центру.

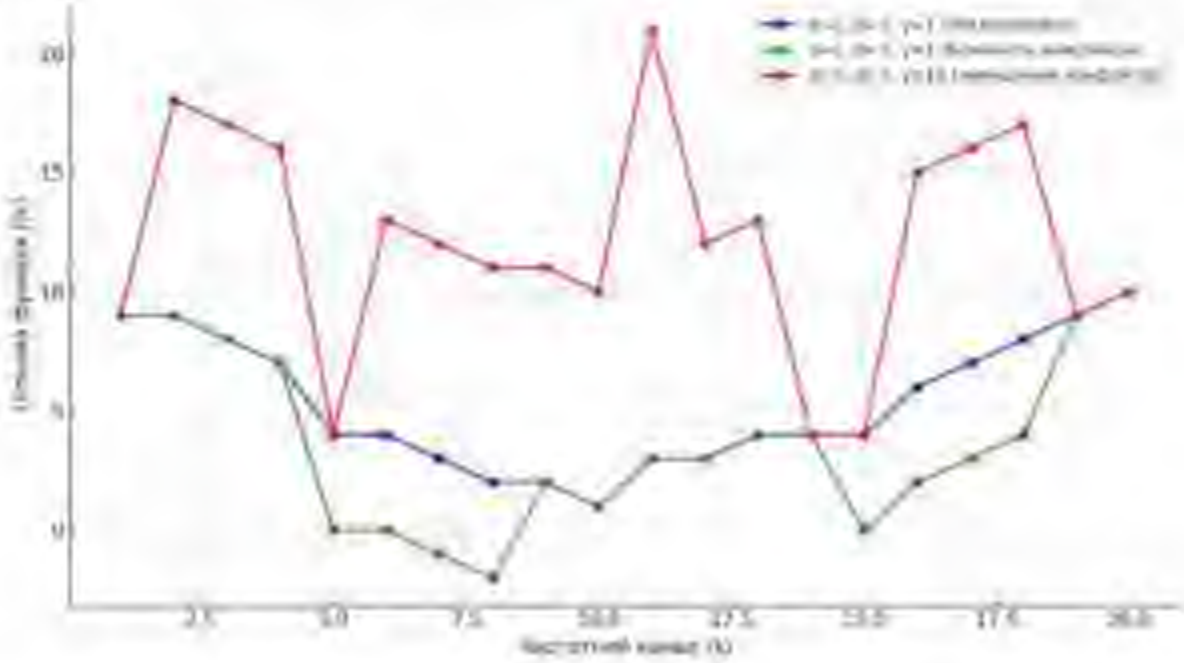


Рис. 3 – Розрахунок цільової функції частотного планування від номера каналу при різних вагових коефіцієнтах

При збільшенні ваги коефіцієнта бажаності (β=5), значення цільової функції суттєво зменшуються для каналів, які системно визначено як менш завантажені. Це відображає здатність функції адаптивно реагувати на статистичну інформацію про спектральне навантаження і спрямовувати планування у бік частот, що потенційно є менш зашумленими або менш використовуваними. Візуально це проявляється як чітке зниження функції втрат у діапазонах каналів 5–8 та 15–18, які заздалегідь були позначені як пріоритетні.

Найбільш помітний ефект спостерігається у варіанті з перевагою фактору конфліктності (γ=10), коли система активно уникає каналів, які перебувають у спектральній близькості до вже зайнятих. Графік демонструє локальні піки значень функції саме поблизу частот, що відповідають каналам інших користувачів, що дозволяє зробити висновок про ефективну роботу механізму уникнення конфліктів. Такий підхід є особливо корисним у сценаріях високої щільності розміщення радарів, де ризик міжсистемних завад суттєво зростає.

Узагальнюючи, результати моделювання підтверджують доцільність використання параметризованої об'єднаної функції втрат, як засобу адаптивного частотного планування. Регулювання вагових коефіцієнтів дозволяє гнучко адаптуватися до умов спектрального середовища, змінюючи пріоритети системи в залежності від конкретних потреб – від точності до уникнення конфліктів чи ефективного використання доступного ресурсу. Таким чином, сформульований підхід відкриває можливість для інтелектуального планування частот у багатокористувацьких FMCW-системах, що особливо важливо для когнітивних радіосистем нового покоління. Подальші дослідження в цьому напрямку передбачають інтеграцію просторової та кутової селективності, а також застосування методів глибинного навчання для прогнозування активності інших учасників спектру.

Висновки. На основі проведеного аналізу, у статті представлено формалізацію та розширення задачі беззаводного частотного планування для багатокористувацьких FMCW-радарів з урахуванням конфліктів між передавачами. Розглянуто ключові фактори, які впливають на взаємні перешкоди між радарами, зокрема частотний нахил чірп-сигналів, часове вікно передачі та просторове рознесення сигналів. Показано, що оптимізація частотного плану повинна враховувати не лише жорсткі умови уникнення перекривання спектрів, але й адаптивну вагову пріоритезацію частот відповідно до сценаріїв застосування, технічних обмежень або спектральної ситуації.

Запропоновано ієрархічний підхід до розподілу нахилів чірпів з урахуванням їх ортогональності, динамічного моніторингу спектру та введення вагових коефіцієнтів до частотних компонентів. Це дозволяє значно покращити ефективність та гнучкість планування в умовах обмеженого та зашумленого спектра, особливо в децентралізованих або мобільних мережах.

Розроблена модель цільової функції з багатокритеріальною оптимізацією, яка одночасно враховує бажаність частоти, ступінь конфлікту та точність розташування в спектрі. Цей підхід відкриває шлях до побудови більш інтелектуальних і самоналаштовуваних FMCW-систем, здатних адаптуватися до змін у середовищі без потреби в централізованому координуванні. Така методика є особливо цінною для інфраструктур майбутнього – інтелектуальних транспортних систем, автономних платформ і когнітивних бездротових мереж.

Список бібліографічного опису

1 Skolnik, M. I. Radar Handbook (3rd ed.). McGraw-Hill, 2008. 1328 p.

2 Hasch, J., Topak, E., Schnabel, R., Zwick, T., Weigel, R., Waldschmidt, C. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3), 2012, pp. 845–860. DOI: https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2178427

3 Xu, Z., Wei, S. FMCW Radar System Interference Mitigation Based on Time Domain Signal Reconstruction. *Sensors*, 23(16), 7113, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/s23167113

4 Zhou, Y., Cao, R., Zhang, A. L. P. An Interference Mitigation Method for FMCW Radar Based on Time–Frequency Distribution and Dual-Domain Fusion Filtering. *Sensors*, 24(11), 3288, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24113288

5 Son, Y.-S., Sung, H.-K., & Heo, S. W. Automotive Frequency Modulated Continuous Wave Radar Interference Reduction Using Per-Vehicle Chirp Sequences. *Sensors*, 18(9), 2831, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18092831

6 Patole, S. M., Torlak, M., Wang, D., Ali, M. Automotive Radars: A Review of Signal Processing Techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 2017, pp. 22–35. DOI: https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914

7 Liu, P., Liu, Y., Huang, T., Lu, Y., & Wang, X. Decentralized automotive radar spectrum allocation to avoid mutual interference using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(1), 2020, pp. 190–205. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02629

8 Xu, Lifan & Zheng, Ruxin & Sun, Shunqiao. A Deep Reinforcement Learning Approach for Integrated Automotive Radar Sensing and Communication. *2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2022, pp. 316-320. DOI: https://doi.org/10.1109/SAM53842.2022.9827815

9.Xiang P., Shan H., Su Z., Zhang Z., Chen C. & Li E-P. Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Decentralized Spectrum Access in Vehicular Networks With Emergent Communication. *IEEE Communications Letters*, 27(1), 2023, pp. 195-199. DOI: https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3214792

References

1.Skolnik, M. I. Radar Handbook (3rd ed.). McGraw-Hill, 2008. 1328 p.
2.Hasch J., Topak, E., Schnabel R., Zwick, T., Weigel R., Waldschmidt C. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3), 2012, pp. 845–860. DOI: https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2178427
3.Xu Z., Wei S. FMCW Radar System Interference Mitigation Based on Time-Domain Signal Reconstruction. *Sensors*, 23(16), 7113, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/s23167113
4.Zhou Y., Cao R., Zhang A., Li P. An Interference Mitigation Method for FMCW Radar Based on Time–Frequency Distribution and Dual-Domain Fusion Filtering. *Sensors*, 24(11), 3288, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24113288
5.Sun, Y.-S., Sung, H.-K., & Heo, S. W. Automotive Frequency Modulated Continuous Wave Radar Interference Reduction Using Per-Vehicle Chirp Sequences. *Sensors*, 18(9), 2831, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/s18092831
6.Patole S. M., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive Radars: A Review of Signal Processing Techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 2017, pp. 22–35. DOI: https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914
7.Liu, P., Liu, Y., Huang, T., Lu, Y., & Wang, X. Decentralized automotive radar spectrum allocation to avoid mutual interference using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(1), 2020, pp. 190-205. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.02629
8.Xu, LiJin & Zheng, Ruvin & Sun, Shunqiao. A Deep Reinforcement Learning Approach for Integrated Automotive Radar Sensing and Communication. *2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2022, pp. 310-320. DOI: https://doi.org/10.1109/SAM53842.2022.9827815
9.Xiang P., Shan H., Su Z., Zhang Z., Chen C. & Li E-P. Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Decentralized Spectrum Access in Vehicular Networks With Emergent Communication. *IEEE Communications Letters*, 27(1), 2023, pp. 195-199. DOI: https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3214792

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-38
УДК 621.396.96
Vekhych Oleksandr[1], PhD student
https://orcid.org/0009-0000-6927-7225
Drobyk Oleksandr[1] *PhD, Professor*
https://orcid.org/0000-0002-9037-6663
[1] State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF TIME SEGMENT PERMUTATION IN A MULTILEVEL OPTIMIZATION METHOD FOR SIGNAL ENSEMBLES

Vekhych O., Drobyk O. Justification of the Efficiency of Time Segment Permutation in a Multilevel Optimization Method for Signal Ensembles. The article proposes a multilevel method for optimizing the durations of time segments in signal ensembles. The method is based on a combination of gradient descent and the Levenberg–Marquardt algorithm, providing adaptive tuning of signal processing parameters considering mutual correlation structure and energy characteristics. Within the framework of the proposed approach, two permutation strategies for time segments were experimentally analyzed: a random permutation method (which disregards correlation structure) and the "nearest neighbor" method (which aims to minimize mutual correlation between adjacent segments). Experimental modeling was performed on five types of quasi-orthogonal sequences (M-sequences, Kasami, Gold, Fibonacci, and exponential sequences). The results demonstrate that the «nearest neighbor» method yields superior performance in terms of mutual correlation and ensemble properties of signals compared to the random permutation approach. In particular, the method achieved a reduction in the variance of the mutual correlation function by up to 22% and an improvement in ensemble characteristics within the range of 8–12%. Signal visualization after permutation confirms a more ordered structure and reduced local amplitude fluctuations. These findings support the rationale for using an adaptive permutation mechanism as one of the essential stages in the formation of signal ensembles with improved correlation properties. Future research directions include extending the optimization model to account for nonlinear channel distortions and integrating the algorithm into cognitive radio systems with dynamic spectrum management.

Keywords: signal ensembles, quasi-orthogonal sequences, correlation, ensemble characteristics, amplitude, telecommunication systems, optimization, communication channel, radio communication, interference immunity, frequency spectrum, frequency and time domain.

Векич О. К., Дробик О. В. Обґрунтування ефективності перестановки часових сегментів при багаторівневому методі оптимізації ансамблів сигналів. У статті запропоновано багаторівневий метод оптимізації тривалості часових сегментів ансамблів сигналів, який базується на поєднанні алгоритмів градієнтного спуску та Левенберга-Марквардта, що забезпечує адаптивне налаштування параметрів обробки сигналів з урахуванням взаємокореляційної структури та енергетичних характеристик. В межах реалізації запропонованого методу експериментально проаналізовано дві стратегії перестановки тривалості сегментів: метод випадкової перестановки (без урахування кореляційної структури) та метод «найближчого сусіда» (з орієнтацією на мінімізацію взаємної кореляції між сусідніми сегментами). Експериментальне моделювання проведено на п'яти типах квазіортогональних послідовностей (М-послідовності, Касамі, Голда, Фібоначчі, експоненціальні). У результаті аналізу, що метод «найближчого сусіда» забезпечує кращі показники взаємної кореляції та ансамблевих властивостей сигналів порівняно з методом випадкових перестановок. Зокрема, досягнуто зниження дисперсії функції взаємної кореляції до 22% та покращення ансамблевих характеристик у діапазоні 8–12 %. Візуалізація сигналів після перестановки підтверджує впорядковану структуру сигналів і зменшення локальних амплітудних флуктуацій. Отримані результати підтверджують доцільність застосування адаптивного механізму перестановок як одного з ключових етапів формування сигнальних ансамблів з покращеними кореляційними властивостями. Перспективними напрямами подальших досліджень є подальше ускладнення моделі оптимізації з урахуванням нелінійних спотворень каналу передачі та інтеграція алгоритму в системи когнітивного радіо з динамічним управлінням спектром.

Ключові слова: ансамблі сигналів, квазіортогональні послідовності, кореляція, ансамблеві характеристики, амплітуда, телекомунікаційні системи, оптимізація, канал зв'язку, радіозв'язок, завадостійкість, частотний спектр, частотна та часова області.

Statement of a scientific problem.

The formation of signal ensembles with enhanced interference immunity and low mutual correlation remains a relevant challenge in modern telecommunication systems. Existing approaches to segmentation and optimization are mostly based on fixed time intervals or isolated parameter processing, which limits their ability to adapt to dynamic changes in signal structure.

Although a number of studies have considered permutations of time or frequency components to improve correlation characteristics, most of them do not account for the adaptive selection of segment durations. Furthermore, the integration of permutation strategies into a comprehensive algorithm for optimal ensemble structure formation remains insufficiently addressed.

Within the scope of this study, the proposed method is grounded in optimization techniques—specifically, gradient descent and the Levenberg–Marquardt algorithm. This enables adaptive selection of

time segment durations, contributing to reduced mutual correlation and enhanced interference immunity under variable signal transmission conditions

Research analysis.

A review of current approaches [1–17] to processing ensembles of complex signals has been conducted, particularly in the context of segmentation, ensemble structure optimization, and reduction of mutual correlation. Studies [1, 2, 7, 9] have explored adaptive and evolutionary segmentation methods for non-stationary signals. However, they do not consider the permutation of signal fragments.

Works [3, 8] investigate blind methods for identifying signal structures, including independent component analysis, yet the use of localized time-domain permutations is not addressed. Research [4, 5, 10] focuses on the formation of signal ensembles with improved correlation properties through the permutation of frequency or time elements; however, these works lack procedures for segment duration optimization that account for the dynamic nature of signals.

Publications [6, 13] present models for cognitive and wideband communication systems but do not incorporate structural adaptation of signals in the time domain prior to transmission. Studies [11, 12, 14] apply approximation methods, including the Levenberg–Marquardt algorithm, yet without integrating them into the process of optimizing temporal permutations.

Therefore, the development of an adaptive method for selecting the duration of time segments remains a relevant research direction, aiming to minimize inter-symbol interference while simultaneously enhancing the ensemble properties of signals.

The purpose of the work.

The purpose of the work is to develop a multilevel method for selecting the duration of time segments in complex signal ensembles.

Presentation of the main material and substantiation of the obtained research results.

To address the problem of optimizing intersymbol and interchannel interference and to ensure the optimal structure of signal ensembles, this study proposes a multilevel method for selecting the duration of time segments [1, 2, 4, 5, 11, 14]. The method is based on nonlinear function approximation using a hybrid approach that combines gradient descent and the Levenberg – Marquardt algorithm.

The proposed method enables adaptive adjustment of signal processing parameters according to the correlation structure, energy characteristics, and orthogonality conditions of the signal. Unlike conventional techniques that rely on fixed time intervals or optimize individual parameters, this method facilitates flexible time-domain segment duration optimization, taking into account environmental variability and sequence types

The structure of the proposed method's implementation algorithm is presented in Fig. 1 and includes the following stages.

Preprocessing stage. Input signals are collected and preliminarily processed through normalization, filtering, and computation of basic parametric characteristics such as amplitude, frequency, duration, and energy. At this stage, orthogonality conditions between signals are preliminarily verified by computing the integral mutual correlation [4, 5, 17]. If the orthogonality conditions are satisfied, the signals are segmented into time fragments with minimal mutual dependency.

Stage 1. Signal segmentation and classification.

Signals are divided into sequences of varying duration. Additionally, specific characteristics of signal types are taken into account (e.g., impulsive, narrowband, or noise-like structures). The orthogonality between fragments is evaluated as a key criterion for determining the admissibility of ensemble formation.

Stage 2. Permutation and ensemble formation.

Permutation of signal elements within the formed fragments is performed to reduce mutual correlation. Depending on the research task, the algorithm type is selected accordingly (e.g., nearest neighbor method, random permutation, or genetic approach). As a result, a set of new ensembles with improved orthogonal properties is generated.

Stage 3. Ensemble parameter optimization.

The configuration of the signals is optimized using gradient descent and the Levenberg–Marquardt algorithm [11]. The functional structure of the ensemble is refined considering requirements for interference resistance, energy balance, and mutual orthogonality. Subsequently, the effectiveness of the resulting ensembles is evaluated

The described algorithm is visualized in Fig. 1, which illustrates the sequence of stages for the adaptive selection and optimization of time segments in signal ensembles:

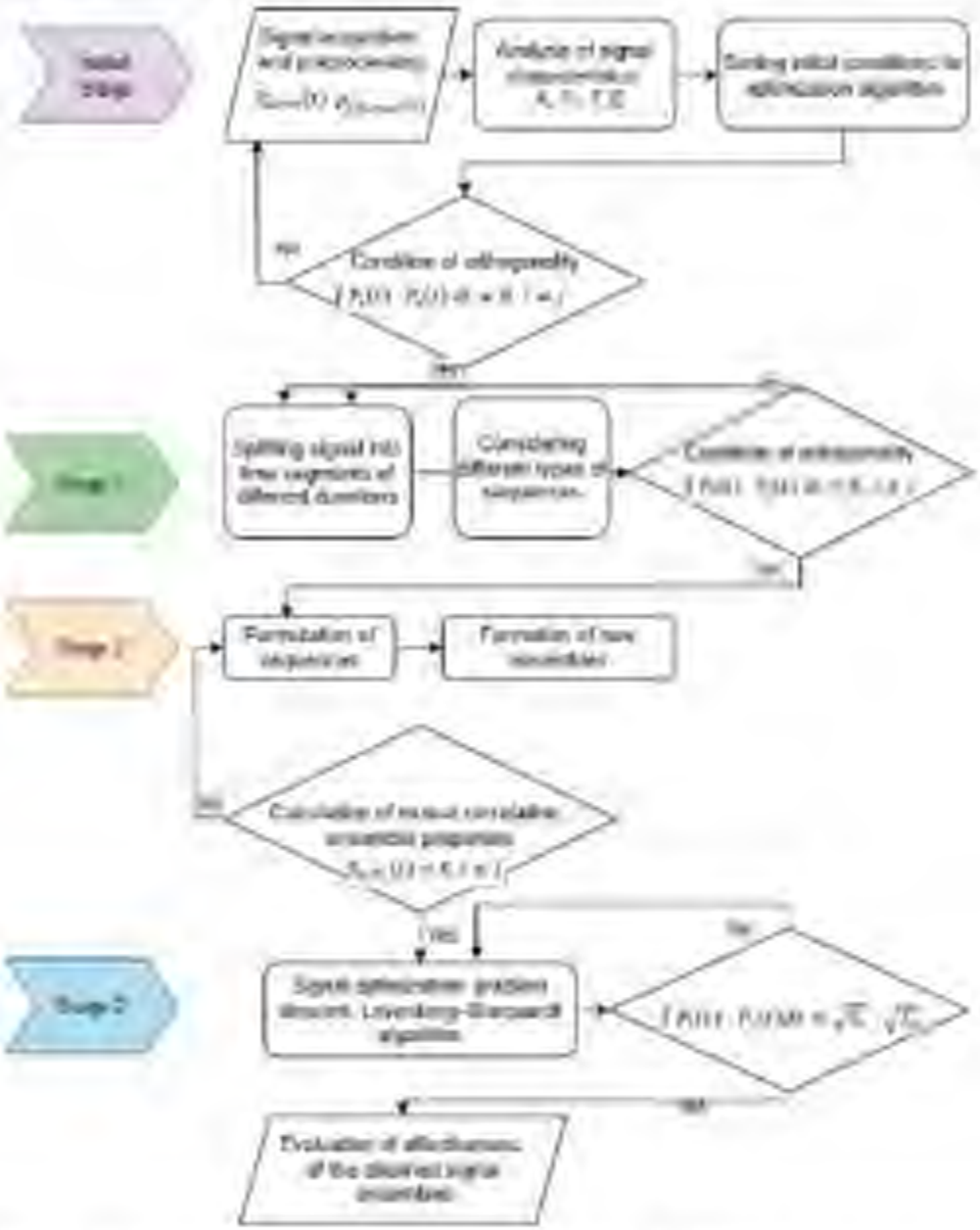


Figure 1 – Block diagram of the implementation algorithm for the adaptive method of time segment duration selection

To verify the effectiveness of individual components of the proposed method, an experimental study was conducted aimed at implementing and comparatively analyzing the permutation stage of time segments (corresponding to Stage 2 in Fig. 1).

To quantitatively analyze the effectiveness of time segment permutation and to evaluate the quality of the resulting signal ensembles, a system of interrelated indicators was employed. These indicators characterize the level of mutual correlation, the stability of the correlation function, and the ensemble properties of the signals. The corresponding metrics were computed using a Python-based software implementation according to the following formulas [4, 5, 17].

1. Maximum correlation stability (R_{max}) – characterizes the maximum value of the mutual correlation function for a given sequence. It is calculated as:

$$R_{max} = \max(R(k)) \quad (1)$$

2. Side lobe maximum (Side lobe max) – reflects the amplitude of the highest correlation peak, excluding the zero shift:

$$\max_{k=0}|\mathrm{R}(k)|, \tag{2}$$

where $\mathrm{R}(k)$ – is the value of the mutual correlation function at shift k, and $k \neq 0$.

3. Mean value of the correlation function (R_{mean}) defined as the arithmetic mean of all values of the mutual correlation function over all shifts:

$$R_{mean} = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\mathrm{R}(k) \tag{3}$$

4. Variance of the correlation function $Var\ (R)$ reflects the variability of correlation values over all shifts and is calculated as:

$$Var\ (R) = \frac{1}{N}\sum_{k}^{N-1}{}_{0}\ (\mathrm{R}(k) - R_{mean})^2 \tag{4}$$

5. Criterion of minimum mutual correlation in the time domain – an approximate threshold indicating the allowable level of maximum mutual correlation between signals, given the signal duration T and bandwidth BW. This criterion is independent of the sequence type and is given by:

$$R_{ij}^{max} \leq \frac{2...5}{\sqrt{T \cdot BW}}, \tag{5}$$

The evaluation of ensemble characteristics was performed using standard indicators in signal theory, including signal base (B), crest factor (CF), root mean square (RMS), and effective spectral bandwidth [4, 17]. Additionally, for a more comprehensive assessment, correlation peak factor (CPF) metrics were employed to quantify the level of local mutual interference in the time domain.

CPF_{mean} (ratio to the mean value) characterizes the deviation of the maximum correlation function value from its average level. High values of this metric indicate the presence of significant inter-channel interference within the system. The formula is given as:

$$CPF_{mean} = \frac{R_{max}}{R_{mean}}, \tag{6}$$

The metric $CPF_{Var(R)}$ (ratio to the variance) reflects the extent to which the maximum correlation value dominates over the background level, taking into account the variability of the entire correlation function. For orthogonal signals, the value of this metric should approach unity. The calculation formula is as follows:

$$CPF_{Var(R)} = \frac{R_{max}}{\sqrt{Var(R)}}, \tag{7}$$

The experiment involved five types of quasi-orthogonal sequences commonly used in telecommunication systems: M-sequences, Kasami sequences, exponential sequences, Gold codes, and Fibonacci sequences. Each of these has distinctive correlation properties, which allow the evaluation of the proposed method's effectiveness under various conditions [17].

The experiment was conducted under high-interference conditions typical for cognitive network scenarios: urban areas with multiple radio signals, industrial zones with electromagnetic disturbances, electronic countermeasures environments, and shielded premises with metallic structures [6, 12, 13]. In such environments, signal overlap increases mutual correlation, while ensemble characteristics deteriorate due to mutual interference (Tabl. 2–7).

For each sequence, the superfactorial index S_n, was calculated, describing the total number of possible permutations of time segments [4, 5]. It is defined by the formula:

$$S_n = \prod_{k=1}^{n}(k!)^{a^k}, \tag{8}$$

where $k!$ – denotes the number of permutations for each segment:

α^k is a weighting coefficient that reflects the type and complexity of the sequence.

In this study, the values of the coefficient α for each sequence type were determined empirically, based on their structural complexity and their impact on the total number of possible permutations. This approach enabled the incorporation of sequence-specific features into the computation of the superfactorial S_n. It was found that when $\alpha > 1$, the factorial values grow excessively, resulting in numerical overflows within the implementation environment, which prevented the correct execution of the permutations. Therefore, the use of $\alpha < 1$ was justified.

The selected values were, for M-sequences α –0.5, for Kasami α –0,6, for exponential α –0.7, for Gold α – 0,8, and for Fibonacci α – 0,9 (see Table 1).

Table 1 – Selection of α coefficients for calculating S_n for different sequences

Sequence Type	α Value	Number of Segments n	Estimated S_n	Computation Notes
M-sequence	0,5	30	$\approx 3{,}8 \times 10^3$	Optimally stable computation
Kasami	0,6	30	$\approx 8{,}2 \times 10^3$	Balanced and reliably computed
Exponential	0,7	30	$\approx 1{,}3 \times 10^7$	Within acceptable limits
Gold	0,8	30	$\approx 1{,}5 \times 10^7$	May become unstable if $\alpha > 0{,}9$
Fibonacci	0,9	30	$\approx 5{,}4 \times 10^7$	At the edge of numerical capacity
Threshold value	1,0	30	$> 10^{10}$	Exceeds computational range – causes overflow

The data presented in Table 1 demonstrate the dependence of the computational complexity of the superfactorial S_n on the value of the coefficient α and the type of sequence used in the experiment. Based on these parameters, correlation indicators were calculated for two different methods of time segment permutation:

the random permutation method, which performs segment rearrangement without accounting for correlation structure (Tables 2 and 3);

– the «nearest neighbor» algorithm, aimed at minimizing mutual correlation between adjacent segments (Tables 4 and 5).

The obtained average values of R_{mean} indicate a moderate level of overall correlation background, ranging from 0,193 to 0,217, which is characteristic of partially correlated sequences that do not ensure strict orthogonality.

Table 2 – Correlation indicators after segment permutation using the random method

Sequence	R_{max}	R_{mean}	$Var\ (R)$	*Side lobe max*	R_{ij}^{max}
M-sequence	0,595	0,206	0,084	0,576	≤0,366…0,914
Kasami	0,602	0,217	0,089	0,589	≤0,366…0,914
Exponential	0,571	0,199	0,079	0,554	≤0,366…0,914
Gold	0,583	0,202	0,083	0,572	≤0,366…0,914
Fibonacci	0,569	0,193	0,077	0,553	≤0,366…0,914

As shown in Table 2, the values of the maximum correlation peak R_{max} for all analyzed sequences lie within the range of 0,569–0,602, indicating a high level of residual mutual correlation. Although the variance $Var\ (R)$ and side lobe maxima remain relatively low, the overall correlation background is high and stable, which prevents the achievement of sufficient orthogonality using the random permutation method.

Thus, the results confirm that the random permutation method is not effective for synthesizing orthogonal signal ensembles. This is particularly critical in real-world telecommunication networks operating under complex interference conditions. In such environments, overlapping spectral components between signals further exacerbate correlation issues. These limitations justify the need for adaptive and optimization-based algorithms that consider the correlation properties of signals and channel conditions when forming robust communication sequences.

Nevertheless, despite these limitations, the random permutation method may still be acceptable in tasks where orthogonality requirements are moderate or when the initial correlation between segments is low. The calculations presented in Table 2 confirm that under such circumstances, this method can achieve conditionally stable correlation function characteristics, which are acceptable for telecommunication systems operating in less aggressive interference environments (e.g., intra-system communication channels or isolated digital networks). Therefore, the method can be used as a basic or preliminary stage in the optimization process, followed by the application of more precise adaptive algorithms.

Table 3 presents the results of ensemble characteristic calculations after random permutation.

Table 3 – Computation of ensemble indicators after random permutation

Sequence	B	CF	RMS	$S_n(\cdot)$	CPF_{max}	CPF_{mean}
M	0.106	3.074	1.008	$3.82 \cdot 10^3$	2.102	1.851
Kasami	0.084	3.443	1.025	8.23×10^3	2.220	1.892
Exponential	0.087	3.381	0.335	1.34×10^7	2.153	1.905
Gold	0.090	3.339	1.011	$1.56 \cdot 10^7$	2.185	1.928
Fibonacci	0.166	2.464	7.399	5.48×10^7	2.244	1.954

As shown in Table 3, the Fibonacci sequence has the highest calculated signal base (B) with a value of – 0.166, indicating more efficient energy utilization of signals after random permutation. The highest crest factor (CF) is observed in the Kasami sequence, with a value of – 3.443, which is undesirable as it indicates the presence of peak values and potentially high inter-channel interference.

The highest root mean square (RMS) value is also observed in the Fibonacci sequence (RMS – 7.399), suggesting high average signal energy after random permutation. From a combinatorial perspective, this sequence exhibits the highest number of possible permutations ($S_n = 5.48 \cdot 10^7$), which creates potential for generating new ensemble configurations. However, the obtained values of CPF_{max} та CPF_{mean} indicate significant variability in the correlation function. This implies that the maximum correlation values significantly exceed the average, complicating the achievement of orthogonality.

Therefore, the analysis of ensemble characteristics confirms that the random permutation method does not ensure the formation of signal ensembles with low mutual correlation. The sequences obtained after permutation exhibit substantial residual correlation, limiting their effectiveness in telecommunication systems with high interference levels.

In this regard, it is advisable to investigate whether alternative approaches to ensemble formation provide better results. For this purpose, an experimental study was conducted on the effectiveness of the «nearest neighbor» permutation algorithm, which considers local correlation characteristics between time segments.

The results of the comparison with the random permutation method are presented in Tables 4 and 5.

Table 4 – Calculation of correlation indicators using the «nearest neighbor» algorithm

Sequence	R_{max}	R_{mean}	$Var\ (R)$	*Side lobe max*	R_{ij}^{max}
M	0,412	0,182	0,068	0,400	≤0,280…0,750
Kasami	0,420	0,190	0,071	0,410	≤0,280…0,750
Exponential	0,380	0,165	0,058	0,370	≤0,280…0,750
Gold	0,398	0,175	0,062	0,385	≤0,280…0,750
Fibonacci	0,360	0,150	0,055	0,350	≤0,280…0,750

The analysis of the obtained indicators demonstrates that the permutation method based on the «nearest neighbor» algorithm exhibits higher efficiency compared to the random permutation method. This is confirmed by the reduction in correlation characteristics:

– for the M-sequence, the value of R_{max} decreased from 0,595 to 0,412 (a reduction of 30,76%);
for the Fibonacci sequence, R_{max} decreased from 0,569 to 0,360 (a reduction of 36,74%)

The average values of the correlation function also decreased: for the M-sequence, by 11,65% (from 0,206 to 0,182), for the Fibonacci sequence, by 22,28% (from 0,193 to 0,150).

Table 5 – Computation of ensemble indicators using the «nearest neighbor» algorithm

Sequence	B	CF	RMS	$S_n(\cdot)$	CPF_{max}	CPF_{mean}

M	0,097	2,898	1,012	$4,86\times10^{7}$	2,540	1,984
Kasami	0,079	3,203	1,023	$9,12\times10^{7}$	2,592	1,991
Exponential	0,082	3,102	0,342	$1,78\times10^{7}$	2,603	1,999
Gold	0,086	3,083	1,014	$2,03\times10^{7}$	2,612	2,010
Fibonacci	0,151	2,325	7,403	$6,02\times10^{7}$	2,625	2,017

According to the calculations, the variance of the correlation function (Var *(R)*) decreases for all sequences when using the «nearest neighbor» algorithm, indicating reduced variability of inter-segment correlation. The most significant reduction is observed for the Kasami sequence, where the variance decreases from 0,089 to 0,071, corresponding to a 19,32% decrease. This trend reflects a more stable form of the correlation function after applying the «nearest neighbor» permutation algorithm, which contributes to the formation of signal ensembles with more predictable correlation behavior and improved resistance to mutual interference.

The signal base (B) decreases in all cases after optimization using the «nearest neighbor» method, indicating a more efficient distribution of energy across segments. For instance, for the M-sequence, the reduction amounts to 7,55%, and for the Kasami sequence – 7,14%, which demonstrates the method's ability to reduce signal redundancy and improve the spectral compactness of the ensemble.

The crest factor (CF) also demonstrates a general decreasing trend: for the Kasami sequence by 7,06%, and for the Fibonacci sequence by 5,85%, indicating a reduction in amplitude peaks and a lower potential for inter-channel interference, which highlights the increased uniformity and spectral efficiency of the resulting signal ensembles.

The root mean square (RMS) value remains generally stable, confirming the preservation of the overall signal energy. Only for the exponential sequence is a slight increase observed – by 0,9%. The superfactional (S_f), which reflects the number of allowable permutations, increases after optimization, indicating an expanded configuration space. For the M-sequence, the growth reaches 26,18%, and for the Kasami sequence – 10,94%. The reduction in CPF_{max} and $CPF_{1 \text{ segm}}$ values across all sequence types indicates a decrease in inter-channel interference when applying the «nearest neighbor» permutation algorithm as compared to random permutation, thereby enabling improved correlation characteristics of the signals.

At the same time, the obtained values still do not meet the strict criterion of orthogonality (i.e., values approaching 1), remaining within the ranges: CPF_{max} [2,550 – 2,620] $CPF_{1 segm}$ [1,983 – 2,010]. Nonetheless, these results are significantly improved compared to those after random permutation. Even under such conditions, the optimized algorithm provides an enhancement of 8–12% relative to the random permutation method (CPF_{max} [2,761–2,928], $CPF_{1 segm}$ [2,037–2,060]), confirming its effectiveness in reducing residual correlation. These findings suggest that the «nearest neighbor» algorithm is a promising intermediate solution for signal ensemble optimization, especially in systems where full orthogonality cannot be guaranteed.

Figures 2–6 present a graphical comparison of the sequences after permutation using two approaches: the random algorithm (on the left) and the «nearest neighbor» algorithm (on the right).

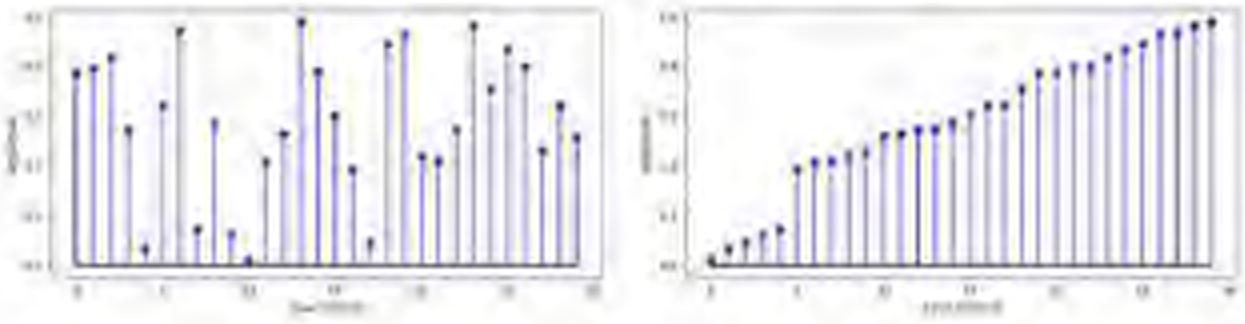


Figure 2 – M-sequence after segment permutations using different methods

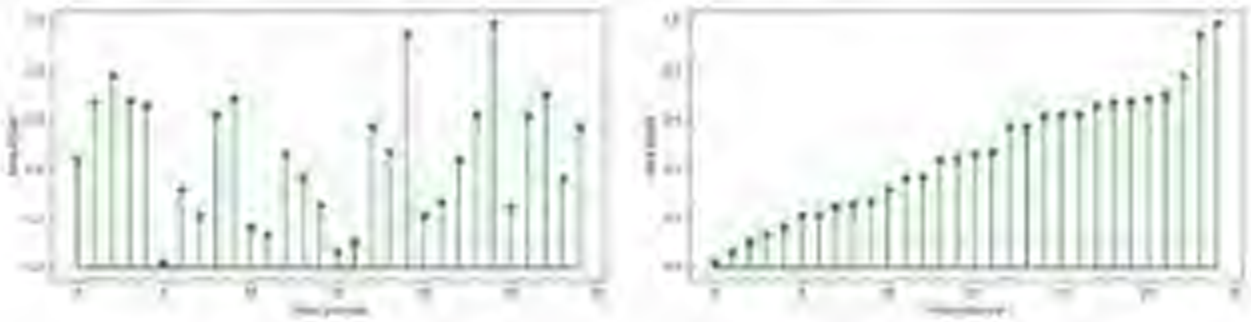


Figure 3 – Kasami sequence after segment permutations using different methods

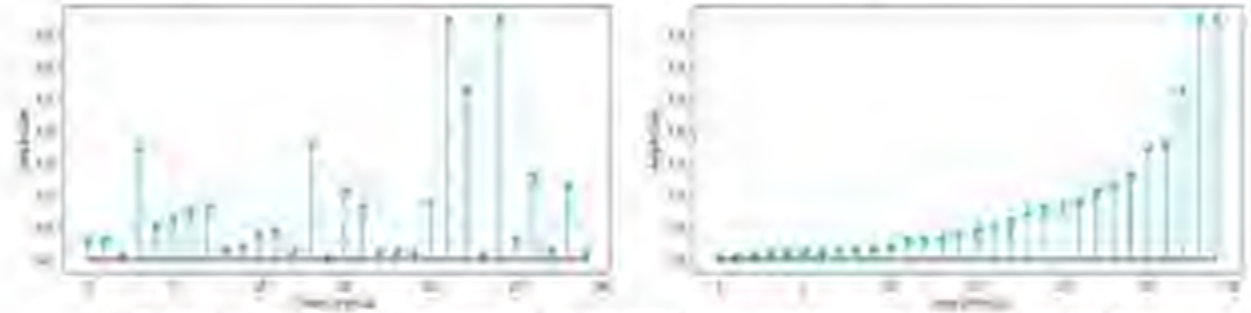


Figure 4 – Exponential sequence after segment permutations using different methods

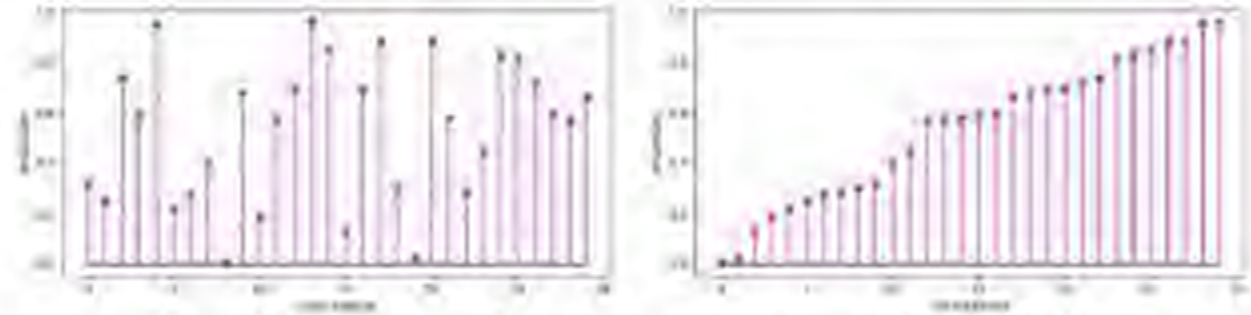


Figure 5 – Gold sequence after segment permutations using different methods

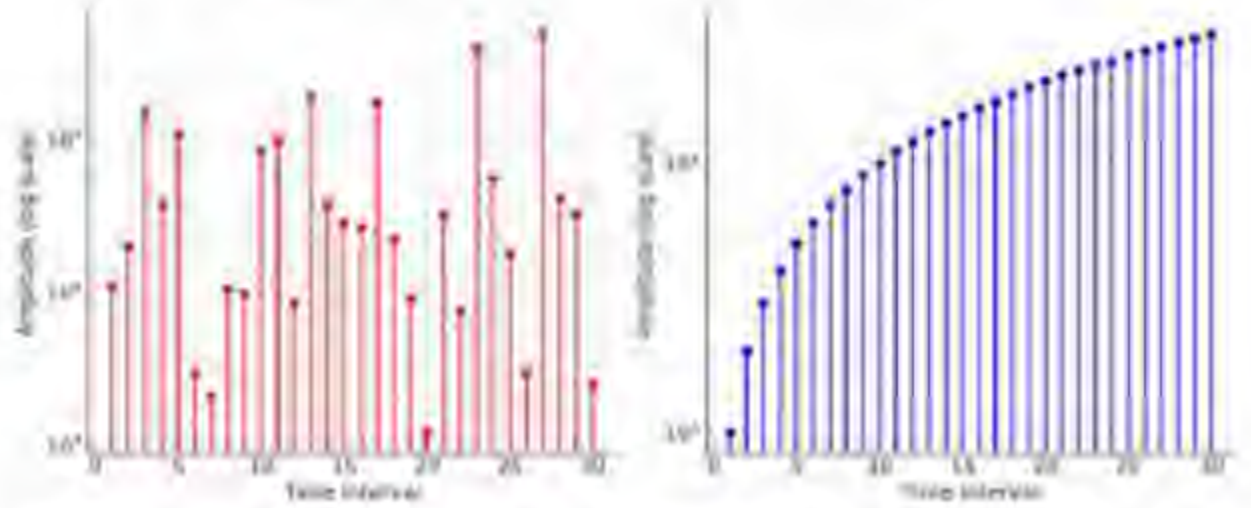


Figure 6 – Fibonacci sequence after segment permutations using different methods (logarithmic scale)

A visual comparison of the figures (left vs. right, before vs. after) demonstrates that the permutation of sequences using the «nearest neighbor» algorithm significantly structures the signals. In contrast to the

random permutation method – where amplitudes are distributed chaotically – the optimized approach ensures a smoother transition of values over time and a more logical sequence arrangement.

This effect is especially noticeable in the cases of the exponential and Kasami sequences, where abrupt jumps and fluctuations disappear. Amplitudes become more aligned, the number of local maxima decreases, and the overall signal shape becomes more orderly and predictable.

For the Fibonacci sequence, the visualization of segment permutations is presented in a logarithmic scale, due to the wide dynamic range of amplitude values differing by several orders of magnitude, which complicates perception in a linear scale.

Thus, applying the «nearest neighbor» method enables a more structured signal form with reduced local mutual correlation between segments. This, in turn, contributes to the reduction of local amplitude fluctuations, which during the subsequent optimization stages of the signal ensemble (as outlined in Fig. 1) may help prevent mutual overlap of segments in the time domain.

Conclusions and prospects for further research.

This study presents a multilevel approach to signal ensemble formation, taking into account both correlation properties and the structural organization of time segments. Particular attention was given to the permutation stage, which represents one of the key elements within the broader optimization algorithm (as shown in Fig. 1). A comparative analysis of two permutation strategies – random shuffling and the "nearest neighbor" algorithm – was conducted to assess their influence on signal characteristics.

The results indicate that applying the «nearest neighbor» algorithm leads to a more ordered internal structure of signals, with reduced local cross-correlation between segments. For certain types of sequences, a decrease in correlation indicators ranging from 8% to 12% was observed, particularly in metrics such as CPF_{mean} and CPF_{weight}. This trend suggests lower amplitude fluctuations within the signal structure and indicates a potential for forming more balanced ensembles.

At the same time, the balance between ensemble size and acceptable cross-correlation levels is preserved – a key factor for designing robust telecommunication systems in noisy environments. The observed dependencies confirm the viability of the proposed approach in scenarios characterized by a high level of inter-channel interference.

Future research will focus on enhancing the subsequent stages of the algorithm, including adaptive optimization of time segment durations and the expansion of evaluation metrics to account for nonlinear transmission channel effects. In addition, the integration of the method into cognitive radio systems with dynamic spectrum management is planned.

Referens

1. Azami H., Arabiesh S. M., Hassanpour H. (2014) An Adaptive Automatic EEG Signal Segmentation Method Based on Generalized Likelihood Ratio. Communications in Computer and Information Science. Vol. 427. 2014. pp. 172-180. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10849-0_18

2. Azami H., Sanei S., Mohammadi K., Hassanpour H. (2013) A hybrid evolutionary approach to segmentation of non-stationary signals. Digital Signal Processing. Volume 23. Issue 4. July 2013. pp. 1103-1114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.02.019

3. Hyvarinen A., Oja E. (2000) Independent component analysis: algorithms and applications. Neural Networks. Volume 13. Issues 4–5. June 2000. pp. 411–430. DOI: https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5.

4. Indyk S. V., Lysechko V. P. (2020) The formation method of complex signals ensembles with increased volume based on the use of frequency bands. Management systems, navigation and communication. Poltava: National University "Poltava Polytechnic Institute n.a. Yuri Kondratiuk". V. 4 (62). 2020. pp. 119-121. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.4.119.

5. Indyk S. V., Lysechko V. P., Kulagin D. O., Zinchenko O. S., Novitin I. V. (2022) The study of the cross-correlation properties of complex signals ensembles obtained by filtered frequency elements permutations. Radio Electronics, Computer Science, Control. National University «Zaporizhzhia Polytechnic». Issue 2 (61). 2022. pp. 15-23. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-2.

6. Jaiodia B., Mahanta A., Ahamed S. R. (2020) IEEE 802.15.6 WBAN Standard Compliant IR UWB Time Hopping PPM Transmitter using SRRC signaling pulse. AEU – International Journal of Electronics and Communications. Volume 117. April 2020. 153119. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153119.

7. McNeill S. I. (2016) Decomposing a signal into short-time narrow-banded modes. Journal of Sound and Vibration. Volume 373. 7 July 2016. pp. 325-339. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.03.015.

8. McNeill S. I., Zimmerman D. C. A framework for blind modal identification using joint approximate diagonalization. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 22. Issue 7. October 2008. pp. 1526-1548. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.01.010

9. Nazari M. et al. (2020) Successive variational mode decomposition. Signal Processing. Volume 174. September 2020. 107610. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107610.

10. Perets K., Lysechko V., Kemar O. (2024) Modeling Nonlinear Signal Components Based on Volterra Series in the Frequency Domain during Spectral Reconstruction. Computer-integrated technologies: education, science, production

Telecommunications and radio engineering. Lutsk. 2024. № 57. pp. 192-201. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-23

11. Sun Y., Wanget P. et al. (2022) Principle and Performance Analysis of the Levenberg-Marquardt Algorithm in WMS Spectral Line Fitting. MDPI Photonics. December 2022, 9(12), 999. DOI: https://doi.org/10.3390/photonics9120999

12. Tsagkaris K., Katidiotis A., Demestichas P. (2008) Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems. Computer Communications. September 2008, 31(14), pp. 3394-3404. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comcom.2008.05.040.

13. Wang Z., Chen Z., Xia B., Luo L. (2016) Modeling and bandwidth allocation of cognitive relay networks. In Proceedings of the 2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), 2016, pp. 1-6. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCChina.2016.7636882

14. Yang D. P., Song D. F., Zeng X. H., Wang X. L., Zhang X. M. (2022) Adaptive nonlinear ANC system based on time-domain signal reconstruction technology. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 162, 1 January 2022, 108056. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108056

15. Yang W. X. (2008) Interpretation of mechanical signals using an improved Hilbert-Huang transform. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 22, Issue 5, July 2008, pp. 1061-1071. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.11.024.

16. Zhou W., Feng Z. (2022) Empirical Fourier decomposition: An accurate signal decomposition method for nonlinear and non-stationary time series analysis. Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 163, 15 January 2022, 108155. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108155

17. Drobyk S. V., Tysechko V. P. (2020) Method of performing intervals taking into account the inter-correlation properties of segments. Management systems, navigation and communication. Poltava: National University "Poltava Polytechnic Institute n.a. Yuri Kondratuk". V. 3 (61), 2020. pp. 128-130. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.128.

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-39
УДК 621.391.8:004.382
Perets Kostiantyn, PhD student
https://orcid.org/0000-0002-3572-7889
Zhuchenko Oleksandr, PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0000-0003-3275-810X
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

METHOD OF LOCALIZED SIGNAL RECONSTRUCTION IN DYNAMIC ENVIRONMENTS BASED ON MODIFIED VOLTERRA SERIES

Perets K., Zhuchenko O. Method of localized signal reconstruction in dynamic environments based on modified Volterra series. The paper presents a comprehensive study and development of an adaptive method for signal reconstruction in dynamic environments. The proposed method is based on the use of modified Volterra series with temporal constraints, where the contribution of kernels is limited by local time windows defined using a smoothing Gaussian function. This approach overcomes the limitations of traditional spectral methods, which, due to the smoothing effect, are unable to accurately reproduce transient or impulsive features of the signal. To detect critical areas of the signal, an instability indicator is introduced, enabling selective activation of the time-limited model only in unstable zones. In stable regions of the signal, reconstruction is carried out using a frequency model, ensuring efficient use of computational resources. Experimental results show an increase in the local coherence coefficient (ALC) in the range of 10–14%, depending on the spatial localization of critical points and the intensity of temporal signal changes, as well as a decrease in the mean squared error (MSE) by 12–18% compared to traditional frequency-based reconstruction methods. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed method for signal processing in cognitive telecommunication systems under complex noise conditions.

Keywords: cognitive telecommunication systems, communication channel, signal, interference, noise resistance, Volterra series, frequency spectrum, reconstruction, optimization, frequency and time domains, Gaussian function.

Перець К. І., Жученко О. С. Метод локалізованої реконструкції сигналів у динамічному середовищі на основі модифікованих рядів Вольтерра. У статті представлено комплексне дослідження і розробку адаптивного методу реконструкції сигналів у динамічних середовищах. Запропонований метод базується на використанні модифікованих рядів Вольтерра з часовими обмеженнями, де вклад ядер обмежується локальними часовими вікнами, визначеними за допомогою згладжувальної Гаусової функції. Такий підхід дозволяє подолати обмеження традиційних спектральних методів, які внаслідок згладжувального ефекту не здатні точно відтворювати перехідні або імпульсні особливості сигналу. Для виявлення критичних ділянок сигналу, а саме областей з різкими змінами або нестійкими динаміками, в роботі введено індикатор нестабільності, що дозволяє здійснювати вибіркову активацію часово обмеженої моделі лише в нестійких зонах. У стабільних ділянках сигналу реконструкція виконується з використанням частотної моделі, що забезпечує ефективне використання обчислювальних ресурсів. За результатами експериментів отримано зростання коефіцієнта локальної когерентності (ALC) в діапазоні 10–14% в залежності від просторової локалізації критичних точок та інтенсивності часових змін сигналу, а також зменшення середньоквадратичної похибки (MSE) на 12–18% у порівнянні з традиційними методами частотної реконструкції. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу у задачах обробки сигналів для когнітивних телекомунікаційних систем в умовах складного завадового середовища.

Ключові слова: когнітивні телекомунікаційні системи, канал зв'язку, сигнал, завада, завадостійкість, ряди Вольтерра, частотний спектр, реконструкція, оптимізація, частотна та часова області, Гаусова функція.

Statement of a scientific problem.

Traditional signal spectral reconstruction methods based on Volterra series of various orders demonstrate high efficiency in recovering global frequency components, but lose accuracy when processing signals with pronounced local temporal variations.

The smoothing effect of such models leads to the loss of critical fragments containing key information, especially in cognitive radio systems. The lack of adaptive approaches capable of combining frequency-domain reconstruction with localized temporal analysis limits modeling accuracy under dynamically changing conditions.

Therefore, it is relevant to develop an adaptive signal reconstruction method which, unlike classical approaches, enables dynamic activation of a localized model within unstable temporal intervals. This approach preserves essential signal features and enhances reconstruction accuracy in environments with complex and variable structures.

Research analysis.

The review of existing domestic and international studies on modeling nonlinear signal components in the frequency domain has revealed that this topic remains insufficiently explored. Studies [1, 4, 5, 12] have investigated the application of Volterra series for modeling nonlinear systems in the frequency domain, particularly for isolating dominant frequency interactions and improving spectral reconstruction accuracy. However, works [6, 10, 11, 14] have not adequately addressed the limitations of spectral models

in reconstructing signals with pronounced local temporal structures, such as impulsive bursts or abrupt amplitude transitions. Publications [2, 3, 7, 9] propose methods of localized time-constrained modeling, including the use of window functions and modified Volterra kernels. Nevertheless, they lack mechanisms for dynamic adaptation to unstable signal segments. In works [8, 13, 15], indicators such as local energy and gradient-based activity are examined for anomaly detection, yet their integration into hybrid time-frequency models remains an open research problem. Therefore, further research is warranted in the areas of automatic critical point detection, integration of local and global models, and reduction of computational complexity for practical use in cognitive radio systems.

The purpose of the work.

The purpose of this study is to develop an adaptive signal reconstruction method based on a localized Volterra series model with dynamic activation, aimed at improving the accuracy of transient feature recovery in nonstationary environments while reducing computational complexity.

Presentation of the main material and substantiation of the obtained research results.

In the article [12], it was substantiated that second-order Volterra series-based signal reconstruction in the frequency domain enables effective modeling of dominant frequency interactions while reducing mean squared error (MSE), even under challenging noise conditions [14,15]. However, such spectral models exhibit inherent limitations when applied to signals with pronounced local temporal structures, such as impulsive bursts, narrowband disturbances, or abrupt amplitude transitions. In these scenarios, transformation into the frequency domain often leads to the smoothing of temporal features, which results in the loss of informative components. This limitation is particularly critical in cognitive radio systems, where localized signal variations may carry essential information or trigger immediate system response [6].

To enhance the accuracy of local feature reconstruction in the time domain, the proposed method introduces a constrained Volterra model. Unlike conventional approaches – either linear convolution with a fixed kernel or nonlinear reconstruction using a full Volterra series model – that process the signal across the entire time axis, the proposed framework selectively targets regions characterized by high temporal instability. This strategy not only prevents the smoothing of crucial transient details but also reduces computational complexity and improves reconstruction quality in dynamically varying signal segments [10,11].

In [12], the system output was represented using a discretized r-th order Volterra model. However, this formulation did nt incorporate the local nature of signal variability. To address this limitation, we introduce a localized temporal window function $\omega(t, t_0, \Delta)$, which restricts the contribution of the Volterra kernel to a specific neighborhood around a reference time point t_0. The modified localized reconstruction model is expressed as [3,9].

$$d_{loc}(t_0) = \sum_{r=1}^{R} \sum_{\tau_1=0}^{M} \dots \sum_{\tau_r=0}^{M} h_r(\tau_1, \dots \tau_r) \prod_{i=1}^{r} x(t_0 - \tau_i) \cdot \omega(t_0 - \tau_i, t_0, \Delta), \quad (1)$$

here: $x(t)$ – denotes the input signal;

$h_r(\tau_1, \dots \tau_r)$ – are the r-th order Volterra kernels.

R is the maximum order of the Volterra expansion;

M is the memory length (maximum lag);

τ_i are time-lag indices over which the kernel operates;

$\omega(t, t_0, \Delta)$ – is the binary window function defined as: $\omega(t, t_0, \Delta) = \begin{cases} 1, if\ |t - t_0| \le 0 \\ 0, if\ |t - t_0| > 0 \end{cases}$

The parameter Δ defines the width of the temporal window centered at t_0, effectively allowing the model to focus only on localized regions of the signal where dynamic features are present. This spatial restriction enhances the sensitivity of the Volterra model to transient behavior while reducing unnecessary computation in stable intervals [3,9]. However, to effectively utilize this localized modeling capability, it is necessary to identify the time points where such transient behavior occurs.

The use of this equation enables the isolation of the temporal context surrounding a suspicious (critical) point, where significant changes in the signal's derivatives occur that cannot be effectively captured through spectral reconstruction.

To identify time moments t_0, where it is appropriate to activate the local temporal model, the proposed method introduces an analytical instability indicator:

$$K(t) = \left| \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \epsilon \frac{dx(t)}{dt} \right|, \epsilon \ll 1. \quad (2)$$

The indicator $K(t)$ combines the signal's curvature and the gradient of local variations, allowing more precise localization of abrupt transitions and anomalies. The coefficient ϵ ensures a balance between sensitivity to discontinuities and robustness against noise. When $K(t) > k$, where k is a detection threshold (experimentally defined according to the expected level of signal variability), the moment $t = t_0$ is identified as a critical point. Such points are characterized by significant changes in the first or second derivative of the signal, indicative of sharp transitions, inflection zones, or local irregularities, that cannot be effectively modeled using global spectral methods. Localized analysis is therefore necessary to preserve the fidelity of transient features in signal reconstruction [2,6].

In practical scenarios, the second derivative of the signal is approximated numerically using a central difference scheme, which offers a computationally efficient and stable method for discrete signal processing. The corresponding finite-difference expression is given by:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} \approx \frac{x(t+\delta) - 2x(t) + x(t-\delta)}{\delta^2}. \quad (3)$$

This formulation is introduced by the authors specifically for use in localized signal reconstruction scenarios, where analytical differentiation is impractical or noisy. The proposed numerical approach eliminates the need for symbolic operations and is particularly well-suited for real-time applications involving sampled or discretized signals.

It is important to note that the proposed method does not rely on L'Hôpital's rule [16], as the signal derivatives are estimated numerically using finite-difference approximations. This approach eliminates the need for limit-based transitions and is better suited for the analysis of digitally sampled signals.

Furthermore, the proposed framework enables the parallelization of critical point detection and the execution of localized reconstruction exclusively within regions exhibiting pronounced instability. This significantly reduces computational overhead and enhances the model's scalability. As a result, the method exhibits dual adaptivity:

– with respect to the kernel order r, which is selected based on the complexity of the local signal structure;

and in time, through dynamic activation of the reconstruction process within selected temporal intervals only.

In addition, to improve the accuracy of identifying complex regions within the signal, it is advisable to incorporate its local energy characteristics. For this purpose, the following indicator is computed [13,14].

1. Local energy of the signal $E(t_0)$ within a temporal window centered at point t_0:

$$E(t_0) - \sum_{t=t_0-\Delta}^{t_0-\Delta} x(t)^2. \quad (4)$$

A high value of $E(t_0)$ indicates the presence of an impulse, spike, or transition, whereas a low value corresponds to a stable (slowly varying) segment, where localized reconstruction is generally unnecessary.

2. Variation intensity (gradient-based activity measure):

$$G(t_0) = \sum_{t=t_0-\Delta}^{t_0+\Delta} \left(\frac{dx(t)}{dt} \right)^2. \quad (5)$$

The indicator $G(t_0)$ quantifies the rate of signal variation within the temporal window and enables the detection of rapid oscillations or discontinuities in the signal's derivative [14].

3. Cumulative instability $C(t_0)$ – a generalized indicator of local signal complexity that integrates both energetic and dynamic components:

$$C(t_0) = Y_1 \cdot E(t_0) + Y_2 \cdot G(t_0), \qquad Y_1, Y_2 > 0, \tag{6}$$

here, Y_1, Y_2 - are weighting coefficients that determine the relative contribution of the energy and variation intensity to the overall complexity assessment [10].

Once the coordinates of the critical points t_0 have been identified, localized signal reconstruction is performed within the corresponding temporal windows. However, to avoid abrupt transitions between the localized and global models, the proposed method incorporates a smoothing window kernel based on the Gaussian distribution [9]:

$$\omega(t, t_0, \Delta) = \exp\left(-\frac{(t - t_0)^2}{2\Delta^2}\right), \tag{7}$$

This kernel performs soft weighted filtering, concentrating the majority of the influence around the center of the window at t_0, while gradually attenuating the weights assigned to neighboring time points.

Fig.1 illustrates an example of a Gaussian window with parameter Δ=0,2 applied to a unit impulse signal. As a result, a smoothing effect is observed, where the impulse influences not only the central point but also the adjacent time samples to a lesser extent.

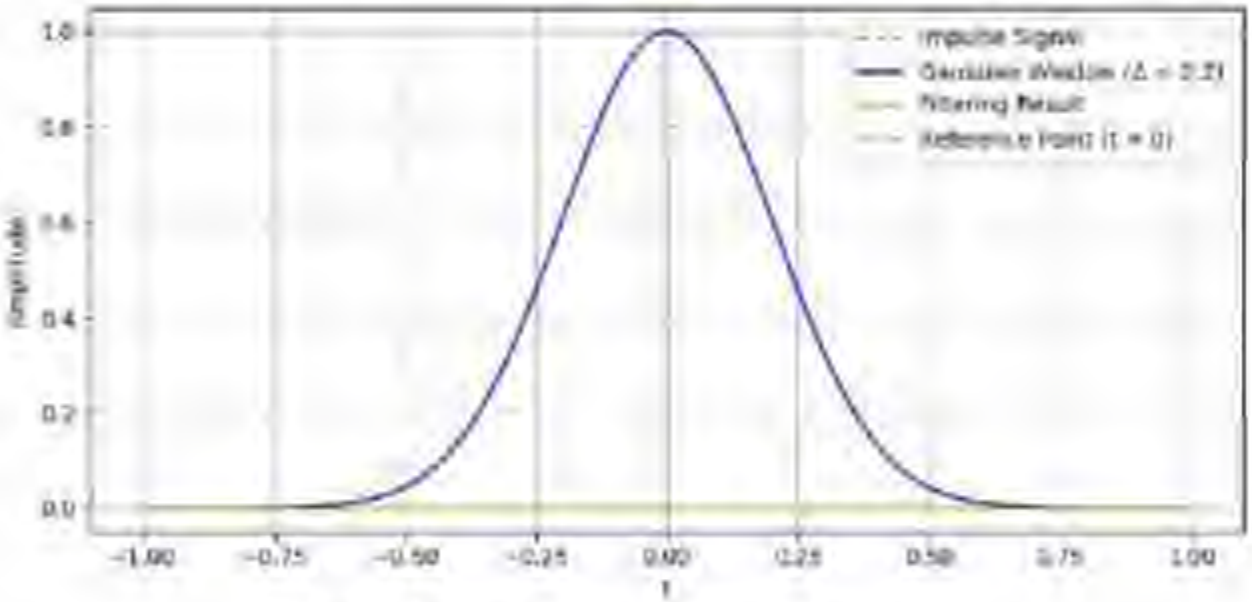


Fig.1 – Impulse filtering using a Gaussian window (Δ = 0,2)

The window spreads the impulse's effect across neighboring points, illustrating the smoothing behavior.

Fig. 2 illustrates how the shape of the Gaussian window changes for different values of the parameter Δ. As Δ increases, the window becomes wider, covering a larger time interval while reducing central concentration. Thus, Δ serves as a spatial control parameter for the scope of the local model.

To ensure consistent signal reconstruction across both stable and critical regions, the localized model is integrated with the global frequency-based approach. This fusion results in an integrated mathematical reconstruction framework defined as follows:

$$\hat{d}(t) = (1 - \alpha(t)) \cdot d_{freq}(t) + \alpha(t) \cdot d_{loc}(t), \tag{8}$$

where $\alpha(t) \in [0,1]$ is an adaptation function determined by the value of the instability indicator $K(t)$.

$d_{freq}(t)$ is the signal reconstructed in the frequency domain (global model);

$d_{loc}(t)$ is the localized model, activated only near critical points.

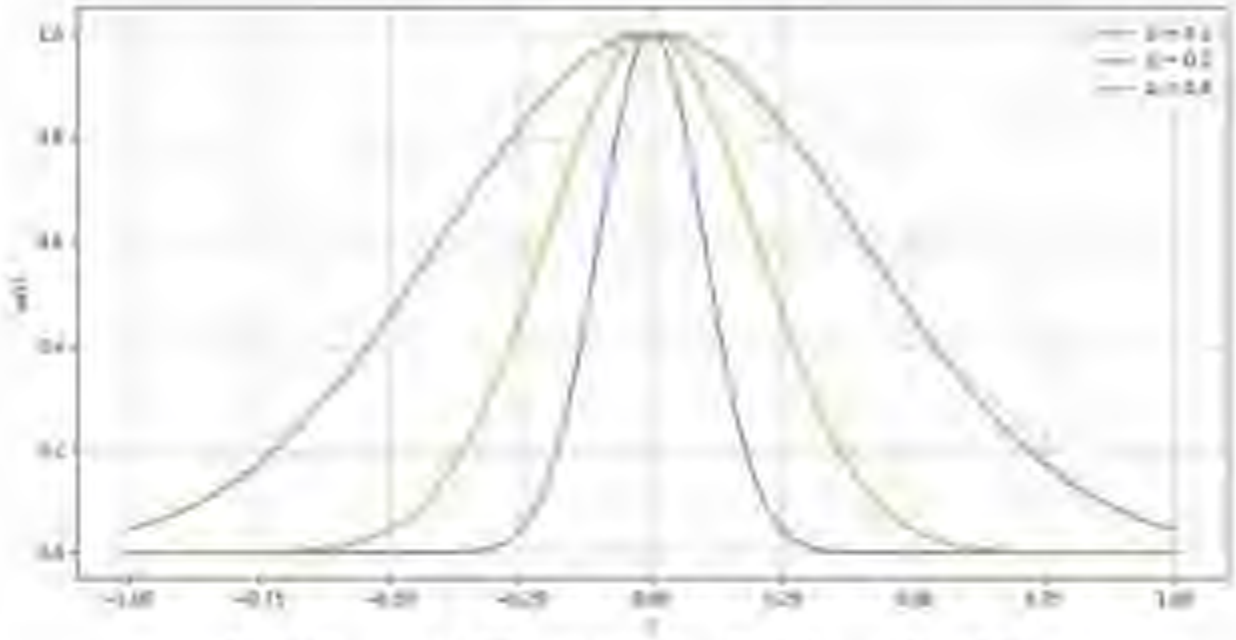


Fig 2 - Comparison of Gaussian windows for different values of Δ

The integration scheme combining frequency-domain and time-domain models using the dynamic weighting coefficient $\alpha(t)$ is proposed by the authors as part of the adaptive reconstruction framework.

The parameter $\alpha(t)$ determines the relative influence of the local and global models on the reconstructed signal:

- when $\alpha(t) = 0$, the reconstruction relies primarily on the spectral (global) model;
- when $\alpha(t) = 1$, the time-domain, locally adaptive model is dominant.

The value of $\alpha(t)$ changes dynamically depending on the instability indicator $K(t)$, enabling the model to flexibly adapt to signal variations and ensuring a smooth transition between time-domain and frequency-domain reconstruction. This prevents discontinuities or abrupt shifts when switching between regions.

To visualize the principle of adaptive switching between the time-domain and frequency-domain models, Tab. 1 and Fig. 3 present an example of how the parameter $\alpha(t)$ changes in response to the instability indicator $K(t)$.

The value of $\alpha(t)$ increases in regions with critical signal changes, thereby activating the local model, and decreases in stable segments where global spectral reconstruction is more appropriate.

Table 1 – Adaptation of the signal reconstruction model

t	$K(t)$	$\alpha(t)$	Dominant model	Comment
0,1	0,002	0,05	Frequency-based (global)	Stable signal, frequency model is appropriate
0,35	0,12	0,65	Time-domain (local)	Critical point detected; local reconstruction activated
0,50	0,08	0,40	Mixed mode	Smooth transition between models
0,72	0,15	0,85	Time-domain (local)	Strong instability
0,95	0,005	0,02	Frequency-based (global)	Return to stable regime

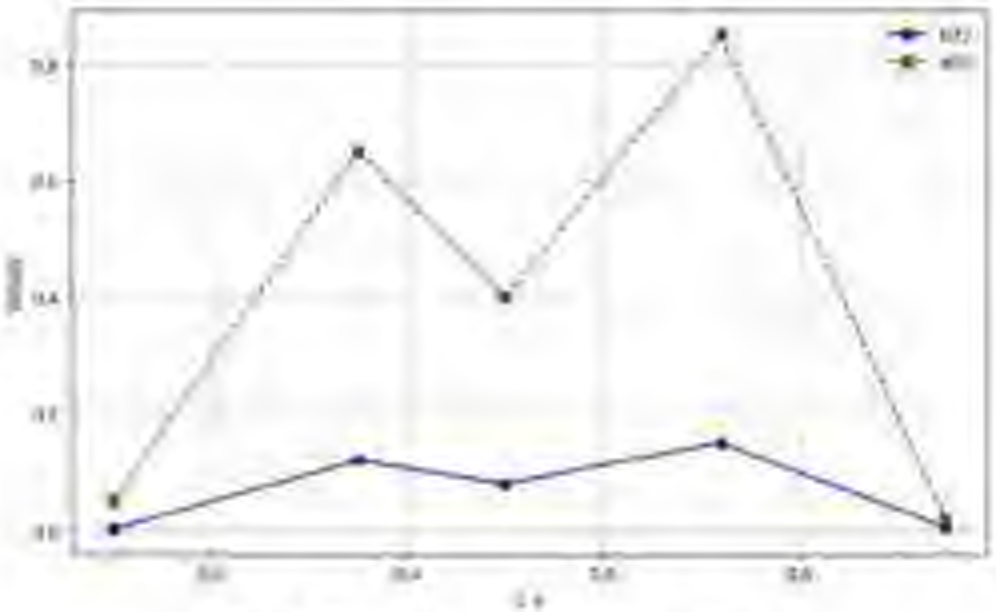


Fig.3 – Dynamics of $K(t)$ and $\alpha(t)$ over time

To validate the effectiveness of the proposed integrated model, it is necessary not only to visualize the dynamics of the adaptation parameters but also to quantitatively assess its impact on signal reconstruction accuracy.

For this purpose, two indicators are calculated: the local alignment coefficient $ALC(t_0)$ and the local mean squared error $MSE_{loc}(t_0)$, which together evaluate the quality of signal restoration near critical points.

$$ALC(t_0) = \frac{\sum_{t=t_0-\Delta}^{t_0+\Delta} x(t) \cdot \hat{d}(t)}{\sqrt{\sum x(t)^2 \cdot \sum \hat{d}(t)^2}}. \tag{9}$$

$$MSE_{loc}(t_0) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{t=t_0-\Delta}^{t_0+\Delta} \left(x(t) - \hat{d}(t)\right)^2. \tag{10}$$

Tab. 2 and Fig. 4 present the modeling results at selected critical points of the signal, allowing for a comparative analysis of the adaptive and traditional reconstruction models.

Table 2 – Comparison of signal reconstruction quality

t_0	$ALC(t_0)$ (traditional)	$ALC(t_0)$ (adaptive)	$MSE_{loc}(t_0)$ (traditional)	$MSE_{loc}(t_0)$ (adaptive)
0,20	0,78	0,84	0,022	0,018
0,35	0,76	0,83	0,024	0,020
0,50	0,74	0,81	0,026	0,021
0,72	0,73	0,80	0,028	0,023
0,88	0,77	0,85	0,023	0,018

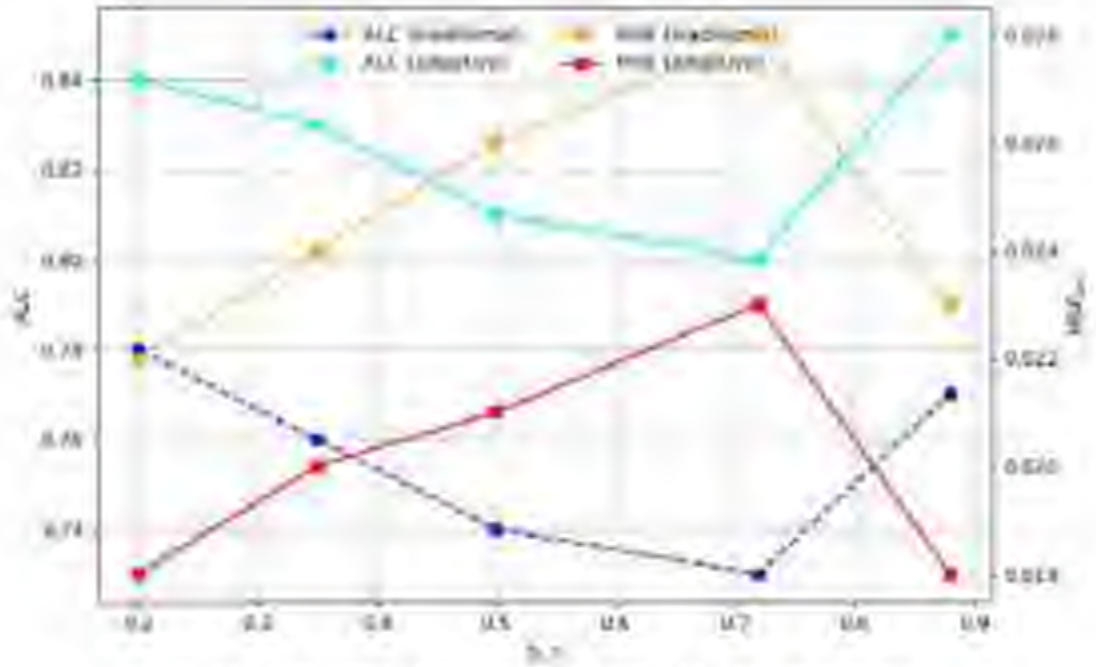


Fig. 4 – Dynamics of $ALC(t_0)$ and $MSE_{loc}(t_0)$ at critical points

As observed from Table 2 and Figure 4, the local alignment coefficient $ALC(t_0)$ increased on average by 10–14%, indicating improved phase and amplitude synchronization of the reconstructed signal. At the same time, the local mean squared error $MSE_{loc}(t_0)$ was reduced by approximately 12–18%, confirming enhanced reconstruction accuracy in dynamically varying segments.

For the purpose of practical implementation, based on the theoretical framework and experimental results presented above, a step-by-step algorithm for adaptive signal reconstruction has been developed (Fig. 5).

Step 1 – Input signal analysis.

The instability indicator $K(t)$ is computed to identify regions with potential abrupt changes in signal structure.

Step 2 – Detection of critical points.

Time instances are selected where the value of $K(t)$ exceeds the predefined threshold K, indicating the need for localized analysis.

Step 3 – Local reconstruction.

At the identified critical points, a localized Volterra model with a Gaussian window is applied to accurately restore signal structure within the corresponding time window.

Step 4 – Global reconstruction.

In stable regions where $K(t)<\lambda$, a frequency-domain model is employed for efficient background signal reconstruction.

Step 5 – Adaptive model fusion.

An integrated signal is formed using the weighting coefficient $\alpha(t)$, which dynamically balances the influence of local and global models based on the degree of instability.

Step 6 – Final signal reconstruction.

The resulting signal $\hat{d}(t)$, combines the strengths of both reconstruction strategies, ensuring high accuracy in dynamic segments while preserving smoothness in stable regions.

The proposed method of localized time-domain signal reconstruction, based on a time-constrained modified Volterra series model, demonstrates high effectiveness in restoring critical signal fragments containing impulsive disturbances, narrowband transitions, or local anomalies. A key advantage of the method lies in its adaptivity both in the time domain (via the instability indicator $K(t)$) and in structural complexity (through variable kernel order selection). The use of a smoothing Gaussian window enables seamless integration of local and global reconstruction processes, while the weighting coefficient $\alpha(t)$ ensures a dynamic response to signal variability.

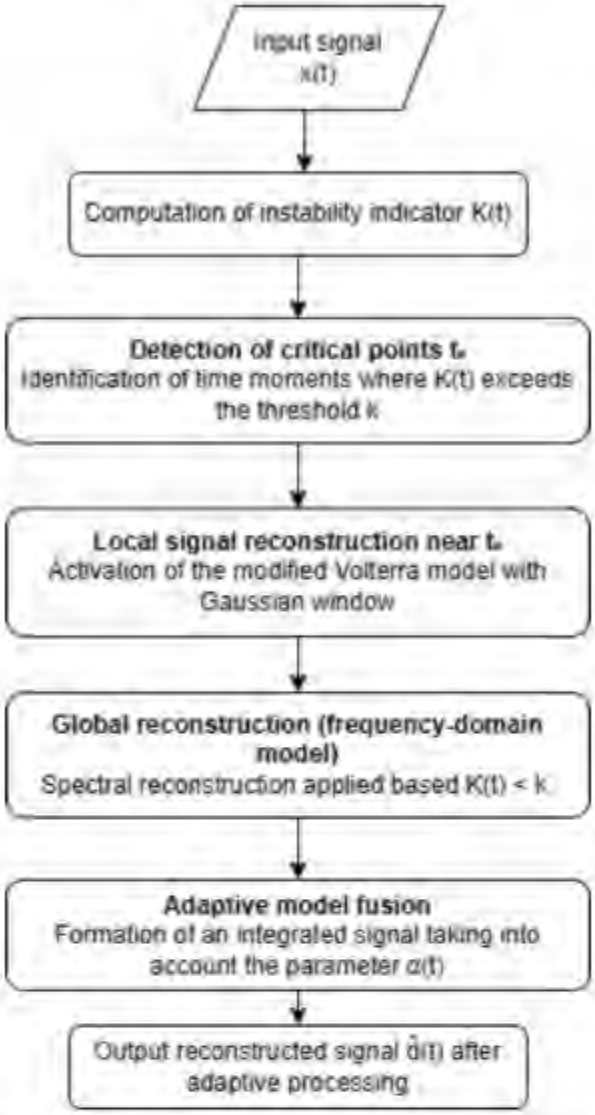


Fig. 5 – Block diagram of the adaptive signal reconstruction algorithm

As a result, the method enhances both phase and amplitude alignment, as reflected by an average increase in the local alignment coefficient $ALC(t_0)$ of 10–14%, and a reduction in the local mean squared error $MSE_{loc}(t_0)$ within the range of 12–18%, which meets the accuracy requirements for dynamic environments. Overall, the method provides structurally consistent signal reconstruction across all time regions, preserving accuracy and information integrity even under noisy or unstable conditions.

Conclusions and prospects for further research.

The study presents a novel adaptive signal reconstruction method that combines localized time-domain modeling with global spectral techniques through dynamic model fusion. The integration of a modified Volterra series constrained by temporal windows and governed by an instability-driven activation mechanism allows for selective processing of critical signal segments. This method contributes to overcoming key limitations of traditional spectral approaches, particularly in contexts where high temporal resolution and localized accuracy are essential.

Future research may focus on optimizing the structure of the adaptive window function, including the automatic tuning of its width Δ based on real-time signal characteristics. Another direction involves generalizing the instability indicator $K(t)$ by incorporating higher-order derivatives or machine-learned features to improve sensitivity and robustness under various noise conditions.

Overall, the presented method establishes a foundation for scalable, data-aware signal reconstruction solutions adaptable to a wide range of practical and high-variability environments.

References

1. Araujo-Simon J. (2023) Compositional Nonlinear Audio Signal Processing with Volterra Series. arXiv. 2023 https://arxiv.org/abs/2308.07229

2. Boyd S., Chua L. O., Desoer C. A. Analytical Foundations of Volterra Series. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*. Volume 1, Issue 3, 1984, pp. 243–282, DOI: https://doi.org/10.1093/imamci/1.3.243

3. Casenave C. (2011) Time-local formulation and identification of implicit Volterra models by use of diffusive representation. *Automatica*, Vol. 47, 10, October 2011, pp. 2273-2278. https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.08.007

4. Cheng C., Peng Z., Zhang W., Meng G. (2017) Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 87, 2017, pp. 340–364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.10.029

5. Guiomar F. P., Reis J. D., Carena A., Bosco G., Teixeira A. L., and Pinto A. N. (2013) Experimental demonstration of a frequency-domain Volterra series nonlinear equalizer in polarization-multiplexed transmission. Opt. Express, Vol. 21, Issue 1, 2013, pp. 276-288, DOI: https://doi.org/10.1364/OE.21.000276

6. Franz M. O., Schölkopf B. A. (2006) Unifying View of Wiener and Volterra Theory and Polynomial Kernel Regression. *Neural Computation* 18(12), 2006, pp. 3097-118. DOI: https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.12.3097

7. Hall J., Rasmussen C., Maciejowski J. Modelling and control of nonlinear systems using Gaussian processes with partial model information. *2012 IEEE 51st IEEE conference on decision and control (CDC)*, 2012, pp. 5266-5271. DOI: https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426746

8. Kapgate S. N., Gupta S., Sahoo A. K. (2018) Adaptive Volterra Modeling for Nonlinear Systems Based on LMS Variants. *2018 International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2018, pp. 414–419. DOI: https://doi.org/10.1109/SPIN.2018.8474036

9. Libera A., Carli R., Pillonetto G. (2020) A novel Multiplicative Polynomial Kernel for Volterra series identification. IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 2, 2020, pp. 316-321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.179

10. Le T., Markovsky I., Freeman C. T., Rogers E. (2012) Recursive identification of Hammerstein systems with application to electrically stimulated muscle. *Control Engineering Practice*, Volume 20, Issue 4, April 2012, pp. 386-396, DOI: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.08.001

11. Maachou A. et al. (2014) Nonlinear thermal system identification using fractional Volterra series. *Control Eng. Pract.* Volume 29, August 2014, pp. 50-60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.023

12. Perets K., Lysechko V., Kunar O. (2024) Modeling Nonlinear Signal Components Based on Volterra Series in the Frequency Domain during Spectral Reconstruction. *Computer-integrated technologies: education, science, production. Telecommunications and radio engineering*. Vol. 57, 2024, pp.192-201. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-23

13. Yang D. P., Song D. F., Zeng X. H., Wang X. L., Zhang X. M. (2022) Adaptive nonlinear ANC system based on time-domain signal reconstruction technology. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 162, 1 January 2022, 108056, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108056

14. Yang D. P., Wang R. C., Zhang X. M., Yang H. B. (2024) Auxiliary active noise control system based on signal reconstruction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 212, 15 April 2024, 111287, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111287

15. Yazdanpanah H., Carini A., Lima M. V. S. (2019) L_0-Norm Adaptive Volterra Filters. *27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2019, pp. 1-5. DOI: https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8903013

16. Yepes J. D., Ravix D. (2024) On Teaching and Learning the Fundamentals of L'Hopital's Rule in Visual and Intuitive Ways. *2024 ASEE Annual Conference & Exposition*, Portland, Oregon, 2024, DOI: https://doi.org/10.18260/1-2--47809

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-40
УДК 004.378:37.09
Стяглик Наталя Іванівна, к.п.н., доцент
https://orcid.org/0000-0002-0573-3508
Єрмакова Наталя Анатоліївна, ст. викладач
https://orcid.org/0009-0009-6242-2257
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ ГАЛУЗІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ПРАКТИК ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ІТ-КОМПАНІЙ: ДОСВІД ТА ВИКЛИКИ

Стяглик Н.І., Єрмакова Н.А. Формування професійних компетентностей здобувачів освіти галузі інформаційних технологій під час проходження практик із залученням ІТ-компаній: досвід та виклики. У статті розглянуто особливості формування професійних компетентностей здобувачів освіти за спеціальностями галузі інформаційних технологій у процесі вивчення профільних дисциплін та проходження різних видів практик. Окреслено доцільність проведення навчальних практик із використанням принципів підходів до організації взаємодії з орієнтацією на фахові цифрові інструменти та технології та використання можливостей неформальної освіти. Схарактеризовано досвід організації виробничої практики із залученням ІТ-компаній. Проаналізовано переваги такої взаємодії між закладами освіти та представниками ІТ-індустрії, зокрема в контексті розвитку практичних навичок, адаптації до сучасних вимог ринку праці та впровадження актуальних технологій у навчальний процес. Використано теоретичні висновки, що визначають ключові організаційні форми співпраці, серед яких: попередження очікувань учасників, ролей, рівень підготовки студентів, обмеженість ресурсів ІТ-компаній для постійного менторства.

Ключові слова: професійна компетентність, практика, ІТ-компанії, здобувачі освіти, інформаційні технології, співпраця освіти й бізнесу, soft skills, hard skills, цифрові інструменти, штучний інтелект.

Stiabyk N., Yermakova N. Formation of professional competencies of information technology education students during internships with IT companies: experience and challenges. The article examines the features of the formation of professional competencies of students in the field of information technology in the process of studying specialized disciplines and completing various types of internships. The features of conducting educational internships using the latest approaches to organizing interaction with an orientation to professional digital tools and technologies and using the opportunities of informal education are outlined. The experience of organizing industrial internships with the involvement of IT companies is characterized. The advantages of such interaction between educational institutions and representatives of the IT industry are analyzed, in particular in the context of developing practical skills, adapting to modern labor market requirements and introducing relevant technologies into the educational process. The main challenges that arise when organizing such a form of cooperation are identified, including mismatch of participants' expectations, different levels of student training, limited resources of IT companies for mentoring, etc.

Keywords: professional competencies, practice, IT companies, education seekers, information technologies, cooperation between education and business, soft skills, hard skills, digital tools, artificial intelligence.

Постановка проблеми. Сучасний ІТ-ринок перебуває в стані динамічної трансформації, що зумовлена стрімким оновленням технологій, глобалізацією бізнес-процесів та зростанням конкуренції. У таких умовах роботодавці висувають підвищені вимоги до якості підготовки фахівців, очікуючи від них не лише глибоких теоретичних знань, а й здатності оперативно адаптуватися до нових умов, працювати в команді, ефективно комунікувати й вирішувати комплексні завдання. Внаслідок цього пріоритет набуває формування інтегрованих професійних компетентностей, які поєднують технічні, аналітичні та міжособистісні навички. Такий запит ринку зумовлює необхідність переосмислення ролі освітнього процесу, зокрема його практико-орієнтованої складової, яка повинна не лише доповнювати теорію, а й бути інструментом підготовки до реальних викликів професійної діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні наукові дослідження зосереджені на проблематиці ефективного поєднання теоретичного навчання з практичною підготовкою майбутніх ІТ-фахівців. Особливу увагу приділено формуванню професійних компетентностей через інтеграцію освітнього процесу з діяльністю ІТ-компаній. У роботах фахівців відзначається, що практична підготовка виступає не лише додатковим елементом навчання, а й ключовим чинником формування фахової спроможності здобувачів освіти. Серед основних напрямів досліджень можна виділити:

— значення виробничої практики для реалізації здобутих знань у реальних умовах ІТ-індустрії [1];

— необхідність залучення ІТ-компаній як партнерів освітнього процесу [2];

— розвиток міждисциплінарних та м'яких навичок (soft skills), що є критично важливими у

професійній діяльності [3]

Ключові результати досліджень полягають у підтвердженні того факту, що проходження виробничої практики у співпраці з ІТ-компаніями сприяє зміцненню зв'язку між теоретичними знаннями та практичними навичками: формуванню комплексних компетентностей, які охоплюють технічну, організаційну, комунікативну та креативну складові; підвищенню конкурентоспроможності випускників на ринку праці завдяки досвіду вирішення реальних виробничих завдань.

Крім того, в науково-педагогічних дослідженнях пропонуються асоціативні моделі компетентностей, які базуються на аналізі бізнес-процесів ІТ-компаній, що дозволяє визначити, які саме компетентності є найбільш затребуваними для виконання конкретних завдань у проєктах [2]. Компетентності зазвичай розподіляють на три основні блоки:

– професійні – робота з програмним забезпеченням, адміністрування систем, аналіз інформаційних ресурсів тощо;

– ділові – планування, прийняття рішень, командна робота;

– особистісні – адаптивність, критичне мислення, креативність, відповідальність.

Саме гармонійне поєднання різних компетентностей забезпечує ефективність виконання ІТ-проєктів і підвищує конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

Також, в літературі знаходимо окремі підходи до методів та моделей організації компетентнісного навчання, зокрема і в ІТ-галузі. Сучасні дослідження пропонують низку концептуальних моделей формування компетентностей, які ґрунтуються на аналізі потреб ІТ-галузі та специфіки професійної діяльності. Найбільш поширеними є асоціативні моделі, що поєднують очікування роботодавців із освітніми стандартами. Компетентнісний підхід передбачає структуризацію професійних якостей за трьома основними блоками відповідно до класифікації компетентностей: професійні (спеціальні знання та уміння, що відповідають вимогам ІТ-ринку); ділові (навички управління проєктами, комунікації, тайм-менеджменту); особистісні (риси характеру та установки, які сприяють ефективній інтеграції в професійне середовище).

Спираючись на результати досліджень і публікацій та користуючись власним досвідом організації ефективної практичної підготовки здобувачів освіти, окреслимо низку викликів, що потребують реагування:

– необхідність постійного оновлення змісту практик з урахуванням швидкого розвитку ІТ-сфери;

– недостатній рівень координації між закладами вищої освіти та ІТ-компаніями;

– нерівномірний доступ студентів до якісного професійного середовища.

Метою статті є дослідження ефективності формування професійних компетентностей студентів ІТ-спеціальностей у процесі проходження ними різних видів практик, виявлення основних викликів та окреслення шляхів удосконалення цього процесу.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Досягнення поставленої мети спирається на теоретичні основи формування професійних компетентностей.

Перш за все, розглянемо поняття професійних компетентностей у контексті ІТ-спеціальностей та вважатимемо професійну компетентність інтегральною характеристикою особистості, яка відображає здатність ефективно виконувати професійні завдання. В ІТ-сфері професійна компетентність охоплює як глибокі знання алгоритмів, мов програмування, архітектури систем, так і здатність до вирішення нетипових завдань, гнучке мислення та здатність до самонавчання. Всі ці компетентності формуються і відпрацьовуються в ході практичної діяльності. Практична складова освітніх програм з комп'ютерних спеціальностей є ключовим елементом підготовки майбутніх фахівців, адже саме вона забезпечує перехід від теоретичних знань до реальних навичок, необхідних для роботи в ІТ-сфері. Без можливості практичного застосування вивченого матеріалу студенти не здатні повноцінно оволодіти сучасними технологіями, інструментами розробки програмного забезпечення, тестування, адміністрування систем тощо. Саме практична підготовка формує професійні компетентності. Зокрема, практико-орієнтована підготовка студентів, а також знайомство з ІТ-галуззю починається вже з першого року навчання на таких дисциплінах циклу загальної підготовки як "Вступ до фаху" та "Інформаційні технології". Саме там закладається фундамент для опанування цифрової грамотності (основні знання, вміння та навички роботи з програмами офісного пакету, із деякими хмарними сервісами), а також основи

медіаграмотності та роботи зі штучним інтелектом у поєднанні з принципами академічної доброчесності. Своє логічне продовження (ускладнення, спеціалізація) набуті компетентності знаходять у дисциплінах галузевої та фахової підготовки. Так, у процесі виконання лабораторних і практичних занять з таких дисциплін, як "Об'єктно-орієнтоване програмування", "Бази даних", "Веб-програмування" чи "Алгоритми та структури даних", студенти вчаться працювати з реальними інструментами розробки – середовищами програмування, системами контролю версій, хмарними платформами. Усе це дозволяє наблизити навчання до вимог сучасного IT-ринку.

Важливу роль у практичній підготовці відіграють курсові проєкти, під час яких здобувачі освіти мають змогу самостійно або в командах розробляти повноцінні програмні продукти, реалізовувати практичні проєкти (створення вебдодатку, чат-бота, інтернет-магазину або мобільного додатка). Такі проєкти стимулюють розвиток аналітичного мислення, навичок пошуку рішень та планування.

Невід'ємною частиною освітньо-професійної програми є навчальна та виробнича практика, що передбачає тимчасове занурення студентів у професійне середовище. Залучення до проведення практик IT-компаній та організацій, де здобувачі освіти мають можливість зануритися в робочі процеси, командну розробку, познайомитися з принципами життєвого циклу програмного забезпечення, сучасними підходами до проєктного управління, зокрема Agile та Scrum, дозволяє їм відчути реальні умови майбутньої професійної діяльності, налагодити зв'язки з потенційними роботодавцями та краще зрозуміти свої професійні сильні сторони.

Окрему цінність становить участь студентів у хакатонах, проєктній діяльності, професійних конкурсах і конференціях. Подібні заходи розвивають креативність, командну взаємодію та ініціативність. Наприклад, участь у всеукраїнських чи міжнародних конкурсах та хакатонах дозволяє працювати над інноваційними ідеями, створювати прототипи стартапів, презентувати свої рішення фаховій спільноті, формувати вміння ефективної комунікації.

Завершальним етапом практичної підготовки є виконання кваліфікаційної роботи. Вона демонструє рівень сформованих компетентностей і здатність студента самостійно вирішити складну задачу, спираючись на власне дослідження.

Отже, практична складова освітніх програм з комп'ютерних спеціальностей відіграє фундаментальну роль у професійній підготовці здобувачів вищої освіти. Вона забезпечує не лише опанування інструментів і технологій, а й формування готовності до самостійної інженерної та творчої діяльності, що є вирішальним чинником для подальшого професійного успіху випускників.

У рамках цієї роботи більш детально зупинимося саме на різних видах практики, її організації, проведенні, оцінці результатів та перспективах вдосконалення освітнього процесу шляхом залучення IT-компаній.

Навчальна практика – важливий компонент освітнього процесу, спрямований на закріплення теоретичних знань і формування базових професійних умінь. Вона дає студентам можливість набути первинного досвіду виконання типових завдань зі спеціальності, ознайомитися з основними інструментами та методами роботи в галузі IT, а також розвивати навички самоорганізації, аналітичного мислення та роботи з документацією.

Виробнича практика – обов'язкова освітня компонента освітньої програми що супроводжує завершальний етап освітнього процесу, вона дозволяє студентам перенести теоретичні знання у реальний робочий контекст. Така практика проводиться з відривом від навчання, що сприяє повному зануренню до виробничих процесів, формуванню прикладних навичок, розвитку професійного мислення, командної взаємодії та розуміння специфіки бізнес-процесів у галузі IT.

Схарактеризуємо нормативну базу організації практики у закладі вищої освіти. Навчальна проєктно-технологічна практика проводиться без відриву від виробництва (у межах освітнього процесу в університеті) для здобувачів освіти бакалаврського рівня. Підґрунтям для впровадження цієї практики є дотримання галузевого стандарту, а також освітньо-професійних програм відповідних спеціальностей галузі F "Інформаційні технології". Організація виробничої практики регламентується освітніми стандартами, положеннями про практику, угодами з роботодавцями. Важливо забезпечити відповідність між змістом практики та компетентнісною моделлю випускника, закріпленою в освітній програмі.

Розглянемо детальніше особливості організації кожного з видів практики, а також наведемо приклади реальних кейсів, спираючись на власний досвід.

Організація навчальної практики з боку викладача передбачає ретельне планування програми з урахуванням сучасних тенденцій розвитку IT-індустрії. Одним із ключових аспектів є

чітка постановка мети та завдань практики від початку курсу (забезпечення виконання програми та індивідуальних планів), а також методичний супровід та контроль за їх реалізацією впродовж усього навчального процесу. Підведення підсумків відбувається шляхом захисту звітів з навчальної (проектно-технологічної) практики. Варто зазначити, що важливим є не тільки прикінцевий результат, а й відстеження прогресу здобувача освіти протягом усього курсу.

Окреслимо основні форми організації навчальної діяльності здобувачів освіти. Увесь курс навчальної практики складається з аудиторної (за розкладом) та позааудиторної (самостійної) роботи, яка розподілена у наближенні до співвідношення 1:2 відповідно. Саме тому, на нашу думку, доречним та ефективним є підхід зі створення індивідуальної освітньої траєкторії навчання для кожного здобувача освіти. Це вдається реалізовувати за рахунок пропозицій широкого спектру активностей у синхронному (під час практичних занять) та асинхронному (індивідуальному) режимі. Зупинимось більш детально на формах організації роботи, до яких ми залучаємо студентів упродовж навчальної практики.

Для цього наведемо перелік, спираючись на 40-хвилинну тривалість академічної години, як мінімальної облікової одиниці навчального часу:

1. Короткотривалі заходи (1-2 академічні години), які проводяться наживо та/або доступні їх записи: практичне заняття (за розкладом академічної групи), вебінар, воркшоп, мітап, вікторина;

2. Середньотривалі заходи (1-3 дні), які можуть проводитись як у дистанційному, так і в реальному форматі: IT-конференція, тренінг, квест;

3. Довготривалі заходи (3-14+ днів), участь у яких потребує додаткової підготовки та/або підпорядкована розкладу: наукова конференція, конкурс, турнір, хакатон, тощо.

Окрему категорію заходів складають додаткові українські освітні онлайн-ресурси, доступ до яких відкривається після реєстрації. Так на платформі Дія.Освіта використовуємо освітні серіали (аналог онлайн-курсів), симулятори (можливість зануритись у затребувані професії в Україні, зокрема в IT-галузі), тести (тест для пошуку професії, ентеграм, цифрограм, кіберграм, ICDL український цифровий громадянин,) гайди (історії успіху відомих українців, корисні поради щодо використання ШІ, тощо), та подкасти [4]. Платформа професійного розвитку Prometheus, а також студія онлайн-освіти Edera надають широкий спектр онлайн-курсів, доступних для проходження, серед яких опановуємо ті, які належать до категорії безоплатних і вписуються в індивідуальну освітню траєкторію здобувача освіти за обраною спеціальністю [5, 6]. Академія цифрового розвитку також надає для широкого загалу матеріали для ознайомлення з Google-інструментами у форматі міні-практикумів, курсів для освітян, кейсів Google for Education [7]. Також варто відзначити такі закордонні освітні платформи як Coursera, Udemy, Google Digital Workshop, edX, TED, де розміщені матеріали для самостійного опанування здебільшого іноземними мовами, але часто додатково доступний адаптований україномовний переклад або субтитри.

З огляду на вищезазначений перелік ресурсів, зосередимо свою увагу на цифрових інструментах, які використовуємо в освітньому процесі разом зі здобувачами освіти та на м'яких навичках, які набуваються чи вдосконалюються за рахунок цього. Результати представимо у структурованому вигляді (табл. 1), спираючись на власні практичні кейси використання Google-інструментів та додаткових сервісів.

Таблиця 1. Шляхи формування м'яких навичок (*soft skills*).

Навички	Цифровий інструмент	Активності
Менеджмент знань та інформації, уважність, самоорганізація, медіа-грамотність, тайм-менеджмент.	Диск (Drive) Пошук (Search) Пошта (Mail) Нотатки (Keep) Календар (Calendar)	Налаштування доступу з різними правами; пошук, упорядкування та зберігання інформації; планування та інформація про події.
Відповідальність, робота в команді, пунктуальність, орієнтація на результат.	Документи (Does) Таблиці (Sheets)	Створення документації, написання наукових робіт; інтерактивна звітність (з посиланнями на документацію та сертифікати).

Презентація результатів власної діяльності (селф)-брендинг), креативність, логічне мислення, дизайн, нетворкінг, веброзробка.	Презентації (Slides) Малюнки (Drawings) Сайти (Sites) Блог (Blogger), Форми (Forms)	Створення інтерактивних командних та персональних презентацій, цифрових-портфоліо, блогів, анкет, опитувальників, квестів, вікторин, тощо.
AI-skills, критичне мислення, адаптивність, володіння мовами, швидке читання, академічна доброчесність.	Штучний інтелект (Gemini та Gem-боти) Chat GPT, DeepL, Gamma	Написання промптів для пошуку та обробки текстової інформації, професійний адаптований переклад, генерації зображень, створення заготовок презентацій
Командна робота, позитивне мислення, емпатія, впевненість, активне слухання, почуття гумору, відкритість, доброзичливість, результативність.	Kahoot/Polls and Questions/Mentimeter Canvas, RemoveBg Emoji Kitchen, MemeMaker Lucidspark Zoom/GMeet	Інтерактиви: швидкі опитування, хмари слів, створення колажів, редагування зображень, створення емоджі, мемів, інтелект-мапи, мозкові штурми, відеозустрічі з їх функціоналом (лупка, чат, кімнати, запис і т.д.).

Наведений нами перелік не є вичерпним, постійно вдосконалюється та адаптується в залежності від потреб викладачів, запитів і можливостей студентів, а також викликів сучасності. Позитивні враження, відгуки від студентів щодо їхнього залучення до різноманітних заходів засвідчують важливість набуття різноманітного досвіду, пов'язаного з опануванням та вдосконаленням *м'яких навичок*, необхідних у майбутній професійній діяльності.

На основі вищезазначеного матеріалу, а також аналізу джерел узагальнимо, що для сучасного ІТ-фахівця важливими є як *soft skills*, які є універсальними для будь-якої професії, так і *hard skills*, прив'язані до сфери діяльності, розвиток яких відбувається в процесі навчання в закладах освіти, а також через *lifelong learning* (навчання протягом життя).

Механізми організації виробничої практики в ІТ-компаніях залежатимуть від вибору форми співпраці між ЗВО та ІТ-компаніями. Існує кілька моделей взаємодії: *стажування* (короткотривале занурення студента у робоче середовище); *дуальна освіта* (паралельне навчання у ЗВО та на підприємстві); *проєктна практика* (виконання реальних або навчально-імітаційних проєктів у команді). Кожна модель має свої переваги та обмеження, які слід враховувати при виборі варіанта організації.

Крім того, можна навести приклади організації практики відповідно до форми взаємодії: офлайн, дистанційна, гібридна. *Дистанційна* модель практики з використанням онлайн-платформ широкого поширення набула після пандемії COVID-19 та рятує українську освіту зараз, під час війни, коли особливо гостро постає питання організації безпечного простору. *Гібридна* модель дозволяє поєднувати офлайн-комунікацію з онлайн-виконанням завдань. *Офлайн* формат залишається ефективним для формування командної взаємодії та менторської підтримки.

Якість практики значною мірою залежить від залучення досвідчених менторів, які не лише контролюють хід виконання завдань, а й формують професійні орієнтири. HR-фахівці допомагають інтегрувати студентів у корпоративну культуру та забезпечують фідбек за результатами практики. Саме тому залучення фахівців-практиків є вкрай важливим і потребує співпраці з бізнесом у питаннях організації різних видів практик.

Щодо ефективних кейсів реалізації практики здобувачів освіти із залученням ІТ-компаній, можна спиратися на досвід співпраці ЗВО з українськими та міжнародними компаніями (наприклад, EPAM, Genesis, Sigma Software, SoftServe, GlobalLogic та інших), які системно організовують практики та стажування для студентів. Такі компанії упроваджують спеціалізовані навчальні курси, менторські програми, оцінювання за кейсами, участь у реальних проєктах.

Як і всі провідні ЗВО України, Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна має низку договорів з ІТ-компаніями щодо організації співробітництва. Таке співробітництво має різні форми та прояви, зокрема представниками компаній проводяться гостьові лекції, тематичні вебінари та профільні майстерки для здобувачів освіти, де студенти мають можливість отримати

реальні поради щодо використання тих чи інших технологій, застосування спеціалізованих цифрових інструментів. А це в свою чергу покращує загальну фахову підготовку і розуміння спеціальності. Живе спілкування з представниками IT-компаній робить практичну підготовку більш наближеною до реальних умов роботи в галузі.

Деякі IT-компанії мають власні платформи фахової підготовки, до яких відкритий доступ і здобувачам освіти. Проходження відповідних практичних курсів, зміст яких відповідає потребам підготовки фахівця за певною спеціалізацією, може бути зарахований здобувачу освіти як результат неформальної освіти відповідно до положень та політики ЗВО. Через ці ж платформи здобувач освіти може отримати первинне консультування щодо побудови траєкторії власного професійного розвитку та можливість визначення рівня своїх навичок за допомогою навігаційних тестів. Пропоновані платформами освітні програми надають студентам глибокі знання з обраного напряму та розширюють розуміння суміжних технологій, роблячи початківців затребуваними фахівцями [8, 9, 10]. Крім того, є варіант використання курсів IT-компаній у рамках проведення навчальних практик здобувачів освіти, можливість такого використання та умови визначаються відповідними договорами співпраці та положеннями закладів вищої освіти про визнання результатів неформального та інформального навчання.

Ще одним прикладом залученості IT-компаній до практичної підготовки здобувачів освіти є ініціатива компанії Genesis з інтеграції інтерактивних курсів до освітнього процесу вивчення дисциплін. Наразі компанія реалізувала вже чотири курси за цією ініціативою: "Створення та розвиток IT-продуктів", "Маркетинг IT-продуктів", "Менеджмент у продуктовому IT" та "Аналітика у продуктовому IT". Пропоновані курси є Всеукраїнськими освітніми курсами-стажуваннями від IT-компанії Genesis на власній LMS-платформі. Курси створено у форматі змішаного навчання для студентів українських ЗВО. Програми курсів дозволяють надати студентам теоретичні знання та практичні навички з відповідних напрямів роботи в IT-галузі, познайомити з типовими завданнями на бізнес-кейсах [11].

Безперечний внесок у розвиток IT-освіти регіону має ГО Kharkiv IT-Cluster, яке в більшості випадків є ініціатором проведення практико-орієнтованих заходів для здобувачів освіти різного рівня [12]. І тут мова більше про профільні програми, які викладаються фахівцями (представниками IT-компаній, що є учасниками кластеру) за окремими напрямами IT-спеціалізацій (DevOps, web, QA, .Net тощо). Така ініціатива IT-Cluster як "Сертифікація IT-дисциплін" націлена на вдосконалення IT-підготовки за рахунок залучення експертів до оцінки вмісту робочих програм навчальних дисциплін та оцінювання якості засвоєння знань і відпрацювання навичок здобувачами освіти. Викладачі ЗВО мають можливість оновити власні дисципліни відповідно до порад і пропозицій фахівців-практиків, що забезпечує актуальність навчальних матеріалів, орієнтацію на практичну підготовку фахівців, потрібних на ринку праці та готових до роботи в умовах сучасних змін та невизначеностей.

Kharkiv IT-Cluster активно долучається і до організації виробничих практик здобувачів, спираючись на потреби компаній та наявний рівень сформованості фахових компетентностей здобувачів освіти. Це дає змогу кафедрам організувати дійсно якісну практику для студентів на базі IT-компаній, обраних відповідно до профілю освітніх програм підготовки здобувачів: студентам – отримати можливість практичної підготовки з можливістю подальшого стажування, інтернатури або навіть працевлаштування в компанії; компаніям – обрати потенційних претендентів на посади, що потребують відповідної технічної освіти та сформованих як професійних так і комунікативних компетенцій.

З огляду на можливості організації практик та переважно дистанційну форму їх проведення в умовах військового стану та необхідності дотримання безпекових вимог, гостро постає питання використання цифрових інструментів для організації й оцінювання практики. У відповідності до виробничих потреб та традиційних і сформованих в компаніях наборів цифрових інструментів, у процесі практики широко застосовуються такі цифрові інструменти, як:

– *Trello, Jira* – для управління завданнями;
– *GitHub, GitLab* – для контролю версій коду;
– *Slack, Discord, MS Teams* – для командної взаємодії;
– *LMS-системи* – для оцінювання та моніторингу прогресу.

Навички використання цих інструментів є невід'ємною складовою формування комунікативних компетентностей майбутніх IT-спеціалістів, адже саме таким чином підтримується комунікація та спільна робота над реальним проєктом.

Щодо оцінки ефективності проходження практики, вона засвідчується реальними результатами: створенням стартапів, портфоліо-проектів, позитивними відгуками студентів та наставників, а також пропозиціями щодо подальшого залучення до підготовчих програм найбільш здібних студентів, працевлаштування кращих учасників практики безпосередньо в компаніях-партнерах.

Висновки з даного дослідження. Основні завдання дослідження вважаємо виконаними: окреслено теоретичні засади професійної компетентності; проаналізовано механізми організації практики із залученням ІТ-компаній; узагальнено практичний досвід співпраці з ІТ-компаніями.

Проте, не можна нехтувати проблеми та викликами в питанні організації практик за участю ІТ-компаній. Схарактеризуємо основні з них.

Перш за все, невідповідність між навчальною програмою та вимогами бізнесу. Освітні програми часто не встигають за стрімким розвитком технологій і запитами індустрії. Це призводить до того, що студенти мають теоретичну базу, але недостатні навички роботи з сучасними інструментами, фреймворками, технологіями.

По-друге, нерівномірний рівень підготовки студентів. Студенти, навіть з однієї спеціальності, демонструють різний рівень знань та практичних навичок, що ускладнює стандартизовану організацію практики і вимагає індивідуального підходу щодо вибору баз практики.

По-третє, питання мотивації як студентів, так і менторів. Деякі студенти сприймають практику формально, без зацікавлення в реальному навчанні. З іншого боку, ментори не завжди мають достатньо часу або мотивації для якісної підтримки студентів. Знову ж, накладається і якість попередньої підготовки студента, адже ментор втрачатиме інтерес до натхненної передачі знань та досвіду, не маючи відповідного підґрунтя в особі здобувача освіти, здатного сприймати передану йому інформацію, поради, рекомендації.

І останнє – труднощі оцінювання практичних результатів. Бо нестача чітких критеріїв оцінювання, відсутність об'єктивних індикаторів ефективності виконаних завдань ускладнює формування прозорої системи зворотного зв'язку та оцінювання.

Спробуємо запропонувати шляхи вирішення цих проблем, подолання утруднень та вдосконалення процесу організації практичної підготовки із залученням ІТ-компаній та представників бізнесу.

Можливість подолання утруднень вбачаємо в переході до індивідуалізованих освітніх траєкторій у межах практики. Адже, впровадження персоналізованих практик, які враховують рівень підготовки, інтереси та кар'єрні орієнтації студентів, сприятиме підвищенню ефективності засвоєння матеріалу. Крім того, велике значення матиме посилення ролі менторства та зворотного зв'язку, бо створення систем наставництва з регулярним зворотним зв'язком, оцінюванням прогресу та рефлексією дозволить зробити процес практики більш гнучким і ефективним. Невід'ємною потребою є її використання цифрових інструментів аналітики й моніторингу результатів. Застосування аналітичних платформ (наприклад, Power BI, внутрішні дашборди компаній) для моніторингу прогресу студентів допоможе формувати об'єктивну картину результатів.

Вважаємо, що досягти подібних результатів можна лише за умови укладання довгострокових стратегічних угод про партнерство між університетами та компаніями, що передбачає спільне планування практик, спільну участь у розробці освітніх програм і залучення фахівців-практиків до викладання.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Серед перспективних напрямів розвитку виокремимо наступні:

– створення адаптивних програм практик на основі компетентнісного підходу;

– розширення партнерства з ІТ-компаніями для спільної підготовки студентів;

– інтеграцію цифрової та медіаграмотності разом із інструментами штучного інтелекту до процесу формування компетентностей.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень та власний досвід організації практичної діяльності у рамках освітніх програм комп'ютерних спеціальностей свідчить про те, що ефективне формування професійних компетентностей майбутніх ІТ-фахівців можливе лише за умови тісної та системної взаємодії між закладами вищої освіти й представниками ІТ-галузі. Виробнича практика є невід'ємним елементом професійної підготовки майбутніх ІТ-фахівців. Її ефективна організація дозволяє не лише сформувати ключові компетентності, а й забезпечити успішний перехід студентів до професійної діяльності. Практична підготовка в умовах реального виробничого середовища є

дієвим засобом розвитку як фахових, так і м'яких навичок, що забезпечує високу готовність випускників до викликів сучасного інформаційного суспільства. Перспективи розвитку виробничої практики як інструменту формування професійних компетентностей полягають у цифровізації управління практикою, персоналізації підходів до студентів, розширенні партнерств із бізнесом і впровадженні практико-орієнтованого навчання як базового освітнього принципу.

Список бібліографічного опису:

1. Касян В. В. Формування професійних компетентностей здобувачів освіти під час проходження виробничої практики. Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія. 2023. № 4. С. 133–139.
2. Петрова Л., Остапевський Б. Адаптивна модель компетенцій в управлінні IT-проєктом // Вчені записки Університету «КРОК». – 2023. – №1 (69). – С. 70–77. – DOI: 10.31732/2663-2209-2022-69-70-77.
3. Підготовка майбутніх педагогів до використання інформаційно-комунікаційних технологій у професійній діяльності : монографія / за заг. ред.: Войтович І.С. / упоряд. Гасюк Н.М. Луцьк, 2020. 277 с.
4. Дія. Освіта. Національна єдукаційна освітня платформа актуальних знань та навичок. URL: https://osvita.diia.gov.ua/
5. Платформа масових відкритих онлайн-курсів Prometheus. URL: https://prometheus.org.ua/
6. Студія онлайн-освіти Educational Era. URL: https://www.ed-era.com/
7. Академія цифрового розвитку. URL: https://www.digitalacademy.in.ua/
8. EPAM Campus – освітня платформа компанії EPAM. URL: https://campus.epam.ua/ua
9. Освітня платформа Sigma Software University. URL: https://university.sigma.software/
10. SoftServe Academy Learning System. URL: https://softserve.academy/
11. Cooperation for shaping the future of ukraine – освітньо-інформаційна платформа Genesis. URL: https://www.genesis-for-univ.com/
12. Проєкти Kharkiv IT Cluster. URL: https://it-kharkiv.com/projects/

References:

1. Kasian V. V. Formuvannia profesiinykh kompetentnostei zdobuvachiv osvity pid chas prokhodzhennia vyrobnychoi praktyky. Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia. 2023. № 4. S. 133–139.
2. Petrova L., Ostapevskyi B. Adaptyvna model kompetentsii v upravlinni IT-proiektom // Vcheni zapysky Universytetu «KROK». – 2023. – №1 (69). – S. 70–77. – DOI: 10.31732/2663-2209-2022-69-70-77.
3. Pidhotovka maibutnikh pedahohiv do vykorystannia informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii v profesiinii diialnosti : monohrafiia / za zah. red.: Voitovych I.S. / uporiad. Hasiuk N.M. Lutsk, 2020. 277 s.
4. Diia. Osvita. Natsionalna edukatsiina osvitnia platforma aktualnykh znan ta navychok. URL: https://osvita.diia.gov.ua/
5. Platforma masovykh vidkrytykh onlain-kursiv Prometheus. URL: https://prometheus.org.ua/
6. Studiia onlain-osvity Educational Era. URL: https://www.ed-era.com/
7. Akademiia tsyfrovoho rozvytku. URL: https://www.digitalacademy.in.ua/
8. EPAM Campus – osvitnia platforma kompanii EPAM. URL: https://campus.epam.ua/ua
9. Osvitnia platforma Sigma Software University. URL: https://university.sigma.software/
10. SoftServe Academy Learning System. URL: https://softserve.academy/
11. Cooperation for shaping the future of ukraine – osvitno-informatsiina platforma Genesis. URL: https://www.genesis-for-univ.com/
12. Proiekty Kharkiv IT Cluster. URL: https://it-kharkiv.com/projects/

DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-41
УДК 621.391.8.004.382
Syvolovskyi Ilia[1], PhD student
https://orcid.org/0000-0002-4592-0865
Komar Oleksii[2], PhD, Associate Professor
https://orcid.org/0009-0002-2894-6556
[1]Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
[2]National Aviation University, Kyiv, Ukraine

A METHOD OF MULTICRITERIA DATA STREAM DISTRIBUTION IN TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON AN EVOLUTIONARY APPROACH

Syvolovskyi I., Komar O. A method of multicriteria data stream distribution in telecommunication networks based on an evolutionary approach. The article presents a method of multicriteria decision-making for the distribution of data streams in telecommunication systems, developed on the basis of the modified genetic algorithm NSGA-III. The proposed model takes into account the dynamic nature of the load, resource constraints, the possibility of delegating tasks between clusters, and predicting peak traffic surges. The problem is formalized as a generalized scheduling problem with a set of criteria, including minimizing the use of node resources, load balancing, and reducing the number of delegated streams. The architecture of the system with the logic of stream processing and interaction of cluster coordinators is described. The developed algorithm includes adaptive updating of reference directions, hybrid ranking taking into account the probability of overload, and dynamic adjustment of the mutation rate according to the predicted load. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by calculating the fitness function and analyzing the resulting Pareto fronts. It is substantiated that the method allows maintaining high flexibility and accuracy of data stream (load) distribution in the variable environment of telecommunication networks.
Keywords: telecommunication systems, evolutionary approach, genetic algorithm, encoding, stream, node, traffic, workload, resource intensity, optimization, algorithm implementation, distribution of data streams, solution, scheduling problem.

Сиволовський І. М., Комар О. М. Метод багатокритеріального розподілу інформаційних потоків у телекомунікаційних мережах на основі еволюційного підходу. У статті представлено комплексне дослідження, присвячене розробці адаптивного методу реконструкції сигналів у динамічних середовищах. Запропонований метод базується на використанні модифікованих рядів Вольтерри з явними обмеженнями, де ядра обмежуються локальними часовими вікнами, визначеними за допомогою згладжувальної Гаусової функції. Такий підхід дозволяє подолати обмеження традиційних спектральних методів, що ігнорують згладжувальний ефект по часу, точно відтворювати нестаціонарні або імпульсні особливості сигналу. Для виявлення критичних ділянок сигналу, а саме областей з різкими змінами або локальними аномаліями, в роботі введено індикатор нестабільності, що дозволяє здійснювати вибіркову активацію часово обмежених моделей лише в нестійких зонах. У стабільних ділянках сигналу реконструкція виконується з використанням частотної моделі, що забезпечує ефективне використання обчислювальних ресурсів. За результатами експериментів отримано зростання коефіцієнта локальної узгодженості (ALC) в діапазоні 10–14% в залежності від просторової локалізації критичних точок та інтенсивності часових змін сигналу, а також зменшення середньоквадратичної похибки (MSE) на 12–18% у порівнянні з традиційними методами частотної реконструкції. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу у задачах обробки сигналів для інтелектуальних телекомунікаційних систем в умовах складного змінного середовища.
Ключові слова: телекомунікаційні системи, еволюційний підхід, генетичний алгоритм, кодування, потік, вузол, трафік, навантаження, ресурсоємність, оптимізація, алгоритм реалізації, розподіл інформаційних потоків, рішення, задача розкладу.

Statement of a scientific problem. In distributed telecommunication systems, efficient processing of data streams is complicated by limited resources, uneven cluster load, traffic spikes, and the need for prompt load delegation. Such systems are characterized by dynamic nature and the presence of many conflicting criteria, which requires finding compromise solutions in real time. To solve this scientific and practical problem, taking into account modern conceptual approaches to multi-objective evolutionary optimization [1-17], a multi-criteria decision-making method for the distribution of data streams is proposed, which involves:

- representing decisions in the form of chromosomes with the assignment of streams to nodes;
- evaluating decisions by a fitness function that takes into account the number of delegations, load balance, and risk of overload;
- adaptive response to changes in traffic by dynamically updating parameters.

The method is versatile and can be implemented on the basis of any multicriteria genetic algorithm. In this study, NSGA-III was chosen because it provides efficient coverage of the Pareto space with a large number of criteria and allows for easy integration of adaptive mechanisms.

The proposed method generates a stable solution under unstable load conditions, provides flexible control over system resources, and can be used for dynamic real-time stream control.

Research analysis. An analysis of current research in the field of multicriteria evolutionary optimization and genetic algorithms in distributed computing environments shows that the problem of efficient stream management under dynamic load remains relevant. The works [1, 8, 9, 11, 17] consider the use of genetic algorithms for routing, coverage, and resource allocation in bandwidth-limited environments, but without taking into account multicriteria and adaptability to changes.

Publications [4-7, 12, 15, 16] focus on the development of NSGA-III and related algorithms. They propose improvements to the approaches for sorting and generating reference points, but the issues of adaptation to variable load and incorporation of predictions remain insufficiently covered. Studies [2, 10, 13] analyze the limitations of metaheuristic methods, and works [3, 14] demonstrate the use of multicriteria optimization for service placement, but do not take into account the specifics of traffic in telecommunications networks.

Thus, the obtained reference scientific and practical results create the basis for further research, in particular in the direction of developing adaptive multicriteria methods for distributing data streams in telecommunication networks, taking into account load spikes and real-time delegation mechanisms.

The purpose of the work. The aim of the study is to develop a method for multicriteria distribution of data streams in telecommunication networks based on the modified genetic algorithm NSGA-III, taking into account the dynamic load, resource constraints and predicted traffic spikes.

Presentation of the main material and substantiation of the obtained research results.

The model of the system in which the proposed method is implemented describes a distributed environment for processing data streams [1,8], and is based on an architecture specially developed for this study, consisting of clusters of computing nodes that can perform a task of the same type. Each cluster contains heterogeneous computing resources and has a coordinator that centrally manages the assignment of tasks to cluster nodes. In case of resource shortage, a mechanism is provided for delegating streams to neighboring clusters or a global supervisor. Data streams enter the system with different rates, may differ in type, resource intensity, and have the property of sudden spikes (increase in resource intensity for a certain period of time). The generalized architecture of the proposed system is shown in Fig. 1.

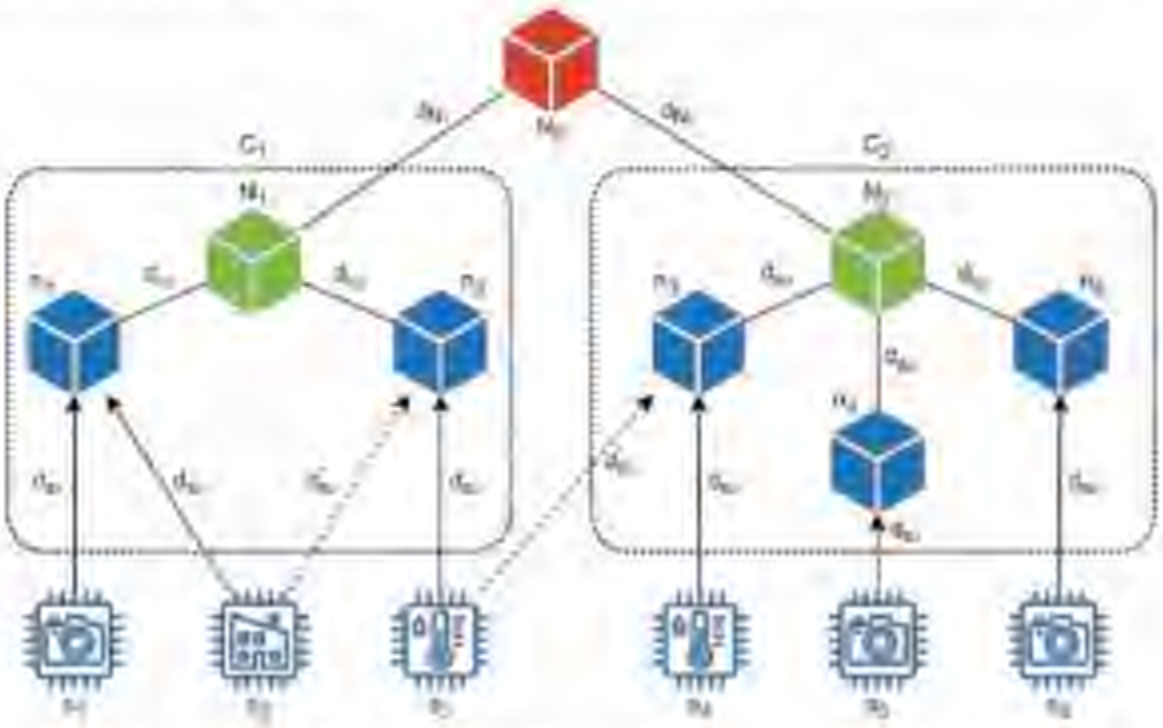


Fig. 1 – System architecture with cluster coordinators and delegation mechanisms

Figure shows that the architecture of the proposed system is represented by clusters (C_1, C_2), each of which consists of computing nodes ($n_1 - n_5$) that perform tasks of the same type but differ in computing capabilities (CPU, RAM, Storage). Each cluster has a coordinator (N_1, N_2), that centrally manages the

distribution of incoming data streams ($d_{S1} - d_{S6}$). In case of resource shortage, a cluster can delegate the data stream to another cluster node ($d_{S2} \rightarrow d'_{S2}$), another cluster ($d_{S3} \rightarrow d'_{S3}$), or a global supervisor (N_F). This architecture forms an adaptive distributed system that can flexibly respond to changes in load, including spikes in stream resource intensity.

The diagram shows computing nodes that physically process streams in blue, cluster coordinators that decide on thread distribution in green, and a global supervisor (N_F) to which streams can be transferred if the cluster cannot process them in red.

At the bottom of the figure are icons that represent typical sources of data streams (s_1-s_6). Each of them illustrates an example of a device or a type of task that generates the corresponding stream:

– the house icon represents streams from smart home devices or the industrial IoT ecosystem;
the camera icon represents video streams or individual image processing tasks;
– the thermometer icon represents streams from temperature sensors or similar environmental monitoring devices.

The proposed architecture forms an adaptive distributed system capable of responding flexibly to load changes, including sudden spikes in resource intensity, which are modeled as statistical events with a probability that increases over time.

Taking into account the objectives of this study, as well as the logic of the distribution of data streams between nodes in the described environment, the model can be presented as a type of multi-criteria scheduling problem [6,8,14]. It includes elements of the placement problem, but is extended with specific constraints that reflect the features and requirements of this study:

– processing of tasks of only a fixed type within each cluster;
– limited computing resources (CPU, RAM, Storage);
– risk of overloading during sudden load surges;
– the need to support flexible delegation in case of resource shortages.

The main characteristics of the system that are taken into account when modeling and solving the optimal distribution problem are shown in Table 1

Table 1 – Main features of the system

Element	Description
Types of tasks	There are several fixed types of tasks (for example, 1-4); each cluster processes tasks of only one type
Data streams	Each stream has: task type, resource intensity (CPU, RAM, Storage), the possibility of short-term spikes in resource intensity
Processing nodes	Within the cluster, heterogeneous in terms of resources, process only streams of one type of task
Clusters	Combine nodes of the same type, each has a coordinator who performs centralized planning
Coordinators	Assign streams to local nodes based on available resources; do not have information about the detailed state of other clusters
Delegation	Only possible in case of overload: to neighboring clusters or to the global supervisor
Load spikes	Occur with a probability that grows exponentially; last for an interval τ and lead to a temporary increase in resource requirements
Stream restrictions	Assignment of each stream: only one node or delegation; control of resource overload, minimization of delegation
Optimization	Utilization of resources, number of delegations, risk of overloading during spikes.

criteria	load balance

Table 2 presents the author's formalization of the main parameters, structural components, and variables used in the proposed method of multicriteria distribution of data streams.

Table 2 – Parameters and notation of indicators

Designation	Value
C	The set of all clusters $\{C_1, C_2, \dots, C_i\}$ that process tasks of type T_k
n_{C_i}	Node in cluster C_i that processes tasks of type T_k
$S_{C_i}^n$	The set of all computing nodes within the cluster C_i: $\{n_1, n_2, \dots, n_j\}$
N_{C_i}	The main cluster node (coordinator) that distributes the load
N_F	A node that acts as a global system supervisor
D	The set of all input data streams $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$
NB_C	A set of neighboring clusters: $NB_C = \{C_1', \dots, C_k'\}$
EX_C	External resources of cluster C: $EX_C = \{NB_C, N_F\}$
$R_{n_{C_i}}$	The set of resources of a node in the cluster C_i: $\left(CPU_{n_{C_i}}, RAM_{n_{C_i}}, STG_{n_{C_i}}\right)$
R_{d_m}	Resource costs (cpu_m, ram_m, stg_m) for processing the data stream d_m
τ	The duration of a possible load spike on the stream
λ	Exponential distribution parameter for estimating the probability of a spike
σ	Load multiplier during the spike. Shows how much additional load the stream consumes during a spike $(\sigma_{cpu}, \sigma_{ram}, \sigma_{stg})$
$x_{m,n_{C_i}}$	Decision variable. It has a value of 1 when assigning a stream d_m to node n_{C_i} within the cluster
y_{m,EX_C}	Decision variable. It has a value of 1 when assigning a stream d_m to a resource from outside EX_C (another cluster or supervisor)
X_m	Generalized decision variable - assignment of a thread d_m to a resource (node, another cluster or supervisor)
F	The objective function vector $F = [f_1, f_2, f_3, f_4]$, which includes optimization criteria: minimization of resource utilization f_1, number of delegations f_2, overload during spikes f_3 and load imbalance f_4
w_{f_a}	Weighting coefficients for each criterion in the function F

To implement the proposed method of multi-criteria distribution of data streams, a system of objective functions f_1, f_2, f_3, f_4 is used to evaluate each assignment option [6,7,13]. In this study, each

possible distribution (potential solution) is evaluated using the vector objective function $F = f_1, f_2, f_3, f_4$, which takes into account both the current state of the computing environment and the potential risks of its overload in the future.

The developed system of criteria within the framework of the proposed method allows achieving the following scientific goals.

1. Assessment of resource utilization efficiency. This aspect is described by the criterion f_1 minimizing the total use of local resources (processor, RAM, storage). It is calculated by the formula (see Table 2 for the designation of indicators):

$$\min f_1 = \sum_{n \in S_L^n} \left(\frac{1}{CPU_n} \sum_{d \subset D} x_{d,n} \cdot cpu_d + \frac{1}{RAM_n} \sum_{d \subset D} x_{d,n} \cdot ram_d + \frac{1}{STG_n} \sum_{d \subset D} x_{d,n} \cdot stg_d \right). \quad (1)$$

2. Assessment of the need to delegate streams. Meets criterion f_2 – minimizing the number of streams that have been delegated to external resources (neighboring clusters or a supervisor):

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^{m} y_{i,EX}. \quad (2)$$

3. Predicting the risk of resource overload in the case of spikes. Criterion f_3 – minimizing the expected overload of resources during a load spike τ, taking into account the probability of its occurrence:

$$\min f_3 = \sum_{n \in S_L^n} (CPU_n^{over} + RAM_n^{over} + STO_n^{over}). \quad (3)$$

The expected resource overload for each node n is calculated using the formulas.

$$CPU_n^{over} = max\left(0, \sum_{d \in D} \left(P_d^{surge} \cdot x_{d,n} \cdot \sigma_{cpu} \cdot cpu_i\right) - CPU_n\right), \quad (4)$$

$$RAM_n^{over} = max\left(0, \sum_{d \in D} \left(P_d^{surge} \cdot x_{d,n} \cdot \sigma_{ram} \cdot ram_i\right) - RAM_n\right), \quad (5)$$

$$STO_n^{over} = max\left(0, \sum_{d \in D} \left(P_d^{surge} \cdot x_{d,n} \cdot \sigma_{stg} \cdot sto_i\right) - STO_n\right). \quad (6)$$

Where the probability of a load spike is calculated as:

$$p^{surge} = 1 - e^{-\lambda \tau} \quad (7)$$

4. Ensuring a balanced distribution of streams between cluster nodes. Evaluated by the f_4 criterion, it minimizes the variance (Var) of the load per node (for CPU, RAM, storage), which ensures a balanced distribution of streams:

$$\min f_4 = Var^{CPU} + Var^{RAM} + Var^{STG}. \quad (8)$$

$$\begin{cases} Var^{CPU} = Var\left(CPU_1^{load}, CPU_2^{load}, \dots, CPU_j^{load}\right), \\ Var^{RAM} = Var\left(RAM_1^{load}, RAM_2^{load}, \dots, RAM_j^{load}\right), \\ Var^{STG} = Var\left(STG_1^{load}, STG_2^{load}, \dots, STG_j^{load}\right), \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} CPU_n^{load} = \dfrac{1}{CPU_n} \sum\limits_{d \in D} x_{d,n} \cdot cpu_d, \\ RAM_n^{load} = \dfrac{1}{RAM_n} \sum\limits_{d \in D} x_{d,n} \cdot ram_d, \\ STG_n^{load} = \dfrac{1}{STG_n} \sum\limits_{d \in D} x_{d,n} \cdot stg_d. \end{cases} \quad (10)$$

The described optimization criteria are applied in the presence of a system of constraints.

1. Unambiguous assignment constraint (each stream must be either processed locally or delegated):

$$X_d = \sum_{n \in S_C^n} x_{d,n} + y_{d,EX} = 1, \forall d \in D. \quad (11)$$

2. Limiting the amount of node resources (each node is not allowed to exceed the available resources):

$$\sum_{d \in D} x_{d,n} \cdot cpu_d \leq CPU_n, \forall n \in S_C^n, \quad (12)$$

$$\sum_{d \in D} x_{d,n} \cdot ram_d \leq RAM_n, \forall n \in S_C^n, \quad (13)$$

$$\sum_{d \in D} x_{d,n} \cdot sto_d \leq STO_n, \forall n \in S_C^n. \quad (14)$$

3. Compatibility of task types (each node can only process tasks of a certain type - this is inherent in the cluster structure and is ensured at the stage of chromosome initialization).

Given these limitations, each potential solution is evaluated using an additive fitness function:

$$F = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 + w_3 \cdot f_3 + w_4 \cdot f_4. \quad (15)$$

To implement the proposed method, a genetic representation of potential solutions in the form of a chromosome is used. Each chromosome encodes one of the possible options for assigning data streams to available resources, taking into account both local nodes and the possibility of delegation.

There are two ways to indicate whether a stream belongs to a node in a chromosome: binary and integer [14].

1. Binary encoding involves creating a set of bits for each stream. The size of such a set is equal to the number of all possible placement directions (all cluster nodes, supervisor, neighboring clusters).

2. The integer encoding uses only one array of integers, where the absolute value of the number is the resource identifier and the sign is its type:

– if the number is greater than 0, it is the identifier of the local node within the cluster;

– if the number is equal to 0, the stream should be allocated to the supervisor node;

– if the number is less than 0, it is the identifier of the cluster to which the stream should be allocated.

If complex cluster and node identifiers are used, this approach can be combined with a mapping table, if necessary, to restore the exact correspondence between the identifier and the resource.

Let's estimate the amount of memory required to represent a chromosome in each of the encoding methods, taking into account the parameters defined for the tasks of this study (Table 3).

The comparison of approaches shown in Table 4 allows us to conclude that the integer approach to chromosome encoding is more efficient for the tasks of this study. Its use provides a significant reduction in memory size, higher scalability, and avoids restrictions on the maximum number of nodes, since there is no need to additionally control whether the stream belongs to internal or external resources.

Table 3 – Memory evaluation for chromosome representation

Parameter	Value
Number of streams S	1000
Number of internal nodes N	16
Number of neighboring clusters N_k	7
Presence of a supervisor N_c	1
The size of the integer cluster identifier	8 bit (1 byte)
Size in memory (binary encoding) $Size_{bin}$	1000 × (16+7+1) = 24000 byte
Size in memory (integer encoding) $Size_{int}$	1000 × 8 = 8000 byte

Table 4 – Evaluating the efficiency of binary and integer encoding

Feature	Binary encoding	Integer encoding
Size in memory	High	Low
Decoding complexity	Simple	Requires mapping
Flexibility of scaling	Limited by the number of nodes	Higher – does not depend on a fixed N
Search speed	Fast bit recognition	Possibly slower, depending on implementation
Versatility	Not suitable for hybrid structures	Works effectively with hybrid systems

The structure of a chromosome using integer coding is shown in Fig. 2.

Fig. 2 – Representation of a chromosome using an integer approach

Based on the given chromosome structure, a modification of the NSGA-III algorithm is proposed to implement the method of multicriteria distribution of data streams. The updated block diagram of the method is shown in Fig. 3. The stages that have been improved are highlighted in green.

The main stages of the modified genetic algorithm NSGA-III include the following:

Stage 1. Initialization of parameters.

At the initial stage, the basic parameters of the genetic algorithm are determined: the number of solutions in the population L_p, the maximum number of generations G_{max}, crossover coefficients P_c and P_m, the number of reference points H, the initial directions r_k, adaptation coefficients a_j, the threshold for improving the value of the fitness function θ.

Stage 2. Generation of the initial population.

The initial population P_0 is not generated randomly, but using heuristics (e.g., First-Fit, Best-Fit, or Least-Loaded methods). This improves the quality and validity of the initial solutions, and also provides for the reservation of some nodes as a buffer in case of future spikes.

Stage 3. Generation of reference points.

Initial reference points are created in the solution space, which are used to orient the algorithm when searching for Pareto-optimal solutions.

Step 4. Calculation of the objective function (fitness function) taking into account the load prediction (improvement).

This stage is realized by estimating the probable load spikes. For each solution (chromosome), the values of the objective functions are calculated, taking into account not only the current but also the potential future load spikes.

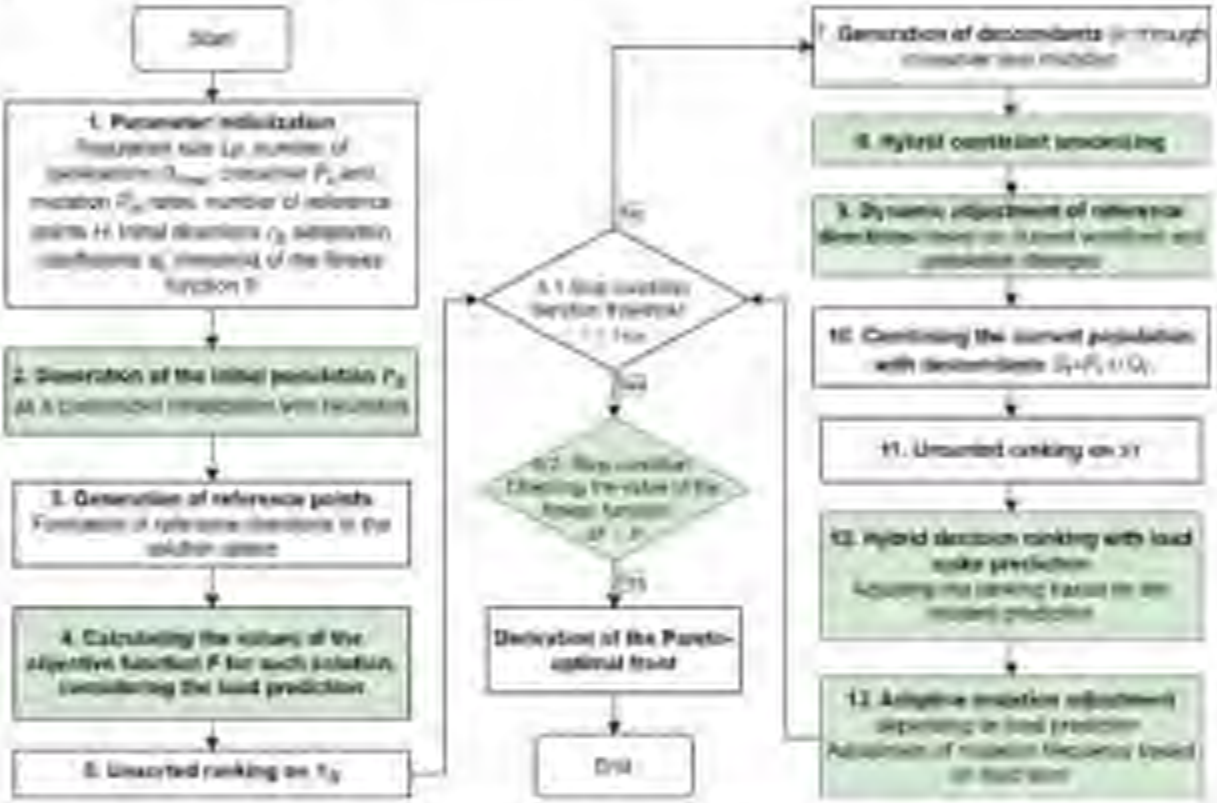


Fig. 3 – Flowchart of the modified NSGA-III algorithm

Stage 5. Unsorted ranking of the initial population.

Ranking of P_0 is performed taking into account the multicriteria evaluation, and a decision front without dominance is formed (unsorted ranking).

Stage 6. Checking the termination conditions.

The conditions for completing the algorithm are checked:

- reaching the maximum number of generations $t \leq t_{max}$ – the number of iterations does not exceed the maximum limit; -

- the improvement in the value of the fitness function between the last and current iteration is less than the threshold $\Delta F < \theta$.

If any of the conditions is met, the algorithm stops and the found Pareto-optimal front is displayed.

Stage 7. Generation of descendants.

New potential solutions (descendants) are created using genetic operators Q_t – crossover and mutation.

Step 8. Hybrid constraint processing (improvement).

Correction of unacceptable solutions is performed (repair operator). Adaptive penalty coefficients $penalty_{adapt}$ are introduced.

Step 9. Dynamic adjustment of reference directions (improvement).

The reference directions are updated adaptively according to load changes, where r_t^{adapt} is the adaptive reference directions at iteration t.

Step 10. Combining the current population with the offspring

The current population and the newly generated offspring are combined for further ranking and selection: $S_t = P_t \cup Q_t$

Step 11. Unsorted ranking of the combined population

The ranking of the combined population S_t is performed, and a new decision front without dominance is formed.

Stage 12. Hybrid ranking of solutions with spike load prediction (improvement).

At this stage, the ranking of solutions is further refined, taking into account not only the current state but also the expected spike load $rank_t^{hyb}$. This allows you to more accurately prioritize solutions based on the risks of future spikes.

Step 13. Adaptive mutation tuning with load prediction (improvement).

At this stage, the mutation rate is adjusted depending on the P_m^{adapt} load prediction, which allows the algorithm to effectively avoid overloads and flexibly respond to changes in the characteristics of input streams.

After performing the adaptive mutation adjustment, the algorithm terminates the current iteration. Next, the algorithm proceeds to check the termination conditions (Stage 6), where it analyzes whether the maximum number of generations I_{max} has been reached or whether the fitness function ΔF has improved between the last and current iteration. If at least one of these conditions is met, the algorithm terminates and the final Pareto-optimal front is generated, which contains the optimal solutions for the distribution of streams, taking into account the defined criteria. If the termination conditions are not met, the next iteration is started (returning to Stage 7) with the subsequent generation of new descendants, and the entire cycle is repeated until the termination conditions are met.

Evaluation of the operational capability of the algorithm implementing the developed method by simulation modeling in Python showed that this method improves system performance in the range of 10-15%.

The proposed modification of NSGA-III provides: high adaptability of the algorithm to load changes in the conditions of dynamic functioning of telecommunication networks; efficient resource balancing and spike load prediction in a distributed environment; fast convergence to high-quality Pareto-optimal solutions, taking into account the specifics of data streams processing and resource constraints.

Conclusions and prospects for further research. The article proposes a method of multi-criteria distribution of data streams in telecommunication networks using the modified NSGA-III genetic algorithm. A mathematical model has been developed that takes into account the limited computing resources, the need for flexible delegation of streams, and the risks of overload during spikes in load. The solution is implemented by genetically encoding the distribution of streams in the form of chromosomes using an integer approach, which is expected to provide high memory efficiency, scalability, and versatility of use in heterogeneous distributed environments.

The developed method allows for adaptive planning of incoming data streams in real time, taking into account load changes and spike load predictions, which can increase network performance by 10-15%. Improvements to the NSGA-III algorithm have improved the quality of Pareto-optimal solutions, flexibility in handling constraints, and efficient load balancing between nodes.

Prospects for further research include: integration of traffic prediction tools using machine learning methods, development of energy saving mechanisms for stream distribution, and implementation of the proposed method in a simulation environment for deeper experimental testing.

References

1. Abdallah W., Val T. (2020). Genetic-Voronoi algorithm for coverage of IoT data collection networks. *30th International Conference on Computer Theory and Applications (ICCTA)*, Alexandria, Egypt, 2020, PP. 16-22, DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13735

2. Bernardino R., Paias A. (2018). Metaheuristics based on decision hierarchies for the traveling purchaser problem. International Transactions in Operational Research, 25(4), 2018, PP. 1269-1295, DOI: https://doi.org/10.1111/itor.12330

3. Blank J., Deb K. (2020). Pymoo: Multi-Objective Optimization, IEEE Access, Vol. 8, 2020, PP. 89497-89509, DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990567

4. Blank J., Deb K., Dhebar Y., Bandaru S., Seada H. (2021). Generating well-spaced points on a unit simplex for evolutionary many-objective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 25(1), 2021, PP. 48-60, DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2020.2992387

5. Cheng R., Jin Y., Olhofer M., Sendhoff B. (2016). A reference vector guided evolutionary algorithm for many-objective optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(5), 2016. PP. 773-791. DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2016.2519378

6. Deb K., Abouhawwash M. (2016). An optimality theory-based proximity measure for set-based multiobjective optimization. *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, 20(4):515–528, 2016. DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2483590

7. Deb K., Jain H. (2014). An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 2014, PP. 577-601. DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2013.2281535

8. Guerrero C., Lera I., Juiz C. (2018). Genetic algorithm for multi-objective optimization of container allocation in cloud architectures. *Journal of Grid Computing*, 16-1, 2018. PP. 113-135. DOI: https://doi.org/10.1007/s10723-017-9419-x

9. Lian Y., Peng P., Jiang K., Xu W., (2024). Multi-objective compression for CNNs via evolutionary algorithm. *Information Sciences*, Volume 661, March 2024, PP. 120-155. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120155

10. Ma Z., Wang Y. (2019). Evolutionary Constrained Multiobjective Optimization: Test Suite Construction and Performance Comparisons. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 23(6), 2019. PP. 972-986. DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2896967

11. Pyrih Y., Kaidan M., Tehaikovskyi L., Pleskanka M. (2019). Research of Genetic Algorithms for Increasing the Efficiency of Data Routing. *3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019. PP. 157-160. DOI: https://doi.org/10.1109/AIACT.2019.8847814

12. Qian H., Wu Y., Qin R., An X., Chen Y., Zhou A. (2025). Provable space discretization based evolutionary search for scalable multi-objective security games. *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 92, 101770, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.swevo.2024.101770

13. Seada H., Deb K. (2016). A unified evolutionary optimization procedure for single, multiple, and many objectives. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(3), 2016. PP. 358–369. DOI: https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2459718

14. Skarlat O., Nardelli M., Schulte S., Borkowski M., Leitner P. (2017). Optimized IoT service placement in the fog. Special Issue Paper. Open access. SOCA. Volume 11, 2017. PP. 427–443. DOI: https://doi.org/10.1007/s11761-017-0219-8

15. Takagi T., Takadama K., Sato H. (2020). Incremental lattice design of weight vector set. *2020 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, GECCO '20*, New York, USA, Association for Computing Machinery, 2020. PP. 1486–1494. DOI: https://doi.org/10.1145/3377929.3390082

16. Veerkan Y., Deb K., Blank J. (2018). Reference point-based NSGA-III for preferred solutions. *In 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2018. PP. 1587-1594. DOI: https://doi.org/10.1109/SSCI.2018.8628819

17. Zitar R. (2022). A Review of the Genetic Algorithm and JAYA Algorithm Applications. *15-th International Congress on Image and Signal Processing*, (CISP-BMEI), Beijing, China, 2022. PP. 1-7. DOI: https://doi.org/10.1109/CISP-BMEI56279.2022.9980332

CONTENTS

ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ ТА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ СТАТЕЙ

- **Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:**

  1) **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

  2) **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор;

  3) **виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**, котрим присвячується означена стаття;

  4) **формулювання мети дослідження** (постановка завдання);

  5) **виклад основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, **висновки** з даного дослідження у тому числі з науковою новизною;

  6) **висновки та перспективи подальших досліджень** у даному напрямку.

- Статті можна подавати українською або англійською мовами. Вона повинна бути набрана у текстовому редакторі MS WORD. **Нумерацію сторінок** не виконувати. **Обсяг статті** 5 повних сторінок і більше (рекомендовано 5-12 ст.).
- **Параметри сторінки**: Верхнє та нижнє поле – 1,5 см, ліве – 2,5 см, праве поле – 2 см. Від краю до верхнього колонтитулу – 1,25 см, нижнього – 1,25 см. Дзеркальні поля. Папір розмір А4.
- У верхньому колонтитулі по центру шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом текст:

  Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво"

  Випуск 20? (випуск №) **

- У нижньому колонтитулі по лівому краю шрифтом Time New Roman розміром 10 пт з одинарним міжрядковим інтервалом прізвища авторів статті: @ Прізвище1 І.П., Прізвище2 І.П.,..
- **Шапка статті містить наступні рядки** шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюються по лівому краю:

  DOI: (заповнюється редактором);

  УДК: (заповнюється автором самостійно);

  Прізвище, ім'я та по батькові 1 автора (напівжирним виділенням), вч ступінь, вч звання

  ORCID 1 автора (у форматі: http://orcid...),

  Прізвище, ім'я та по батькові 2 автора (напівжирним накресленням), вч ступінь, вч звання

  ORCID 2 автора (у форматі: http://orcid...)

  і т.д. (кількість авторів однієї публікації не більше 5)

  Назва організації (у форматі: назва повністю, місто, країна)

- **Назва статті** розміщується через один рядок вище назви організації (усі великі літери, розмір шрифту Time New Roman 11 пт з напівжирним виділенням та вирівнюванням по центру).
- **Анотації** (українською та англійською мовами) повинні містити прізвища та ініціали авторів, назву статті та короткий її зміст і розміщуються через один рядок вище назви статті та набираються з абзацного відступу 1,25 см шрифтом Time New Roman розміром 9 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині. Кожна анотація обсягом 200 слів та формується одним абзацом. Нижче анотацій обов'язково вказуються **ключові слова** (кількість від 5 до 10). У англомовній анотації вказуються прізвища та ініціали імена авторів (без по батькові).
- **Основний текст** статті розміщується через один рядок нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1,25 см шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюється по ширині.
- **Формули** набираються у редакторі формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr, розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формули вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
- **Ілюстрації**, що присутні у статті, необхідно розташовувати у тексті по центру, вирівнювання підписи по центру (Рис. 1. Назва). Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
- **Таблиці** потрібно розташовувати у тексті по центру, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею ставиться її порядковий номер і назва (Таблиця 1. Назва) та вирівнюється по ширині з абзацного відступу.

- **Посилання** на ту чи іншу роботу повинні позначатися в тексті у квадратних дужках за порядковим номером у списку літератури в кінці статті; посилання на джерела статистичних даних обов'язкові; посилання на публікації дослідників обов'язкові; посилання на власні публікації допускаються тільки у випадку крайньої необхідності.
- **Список бібліографічного опису та References.** У даному виданні не публікуються статті, що ґрунтуються на посиланнях країни-агресора. Список літератури («References») потрібно приводити повністю окремим блоком, повторюючи список літератури, який подається українською мовою, незалежно від того, є в ньому іноземні джерела чи ні. Тобто, після статті подається 2 списки: «Список бібліографічного опису» (звичайний список літератури) і «References» (список для міжнародних БД). Необхідно в опис джерела вносити всіх авторів, не скорочуючи їх до трьох, як це рекомендовано діючими у нас державними стандартами. References – повинен бути укладений англійською мовою або транслітерований. Рекомендуємо скористатись сервісом: [illegible] При оформленні інтернет-джерел задля запобігання довгих нерозривних знаків, користуйтесь сервісом скорочення URL-адрес, наприклад: https://hyperhost.ua/tools/uk
- В кінці статті вказується напрямок публікації відповідно до спеціальностей наукового журналу (у журналі виділено такі тематики досліджень: автоматика та управління, інформатика та обчислювальна техніка, телекомунікації та радіотехніка, управління проектами).
- **Статті** **обов'язково** **пересилаються електронною поштою за адресою: cit@lntu.edu.ua**
- Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.
- **Усі рукописи проходять перевірку на плагіат!**

Довідки з питань публікацій та прийому матеріалів у науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» можна отримати у відповідального секретаря – к.т.н. Христинець Наталії Анатоліївни за тел. (0332) 74-61-15.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, ауд. 141.

Автор статті отримує електронний примірник збірника.

Вартість однієї сторінки становить 40 грн. для працівників Луцького НТУ, 50 грн. – для інших авторів. Окремо кожній статті присвоюється DOI (digital object identifier) – ідентифікатор цифрового об'єкту, що веде за собою додаткову оплату 60 грн. за одну статтю.

Кошти можна перераховувати на рахунок: Луцький національний технічний університет https://lntu.edu.ua/uk – Онлайн оплата – Інші платні послуги – р/р UA86 820172 0 3132 4 1 002 2 02 017820 – призначення платежу: «За публікацію в журналі КІТ №н від ______ (ПІБ автора)». Без попереднього рецензування та перевірки на плагіат самостійно кошти на рахунок не надсилати.

Зразок оформлення статті на наступній сторінці

DOI:
УДК 004.02
Ковалець Віктор Геннадійович[1], д.т.н., професор
https://orcid.org/2525-0006-0146-081X
Золотар Ольга Петрівна[2], к.т.н., доцент
https://orcid.org/0005-0005-3007-2462
Сулій Павло Павлович[1], магістрант
Ліпук Микола Сергійович[2], студент
[1]Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
[2]Тернопільський національний технічний університет, м. Тернопіль, Україна
(якщо у статті усі автори з однієї організації, то верхні індекси (цифри) не потрібні; [illegible] повну назву ЗВО, місто та країну)

ПЕРЕХІД ВІД МОНОЛІТНОЇ ДО МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ: АПАРАТНІ МЕТОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ковалець В.Г., Золотар О.П., Сулій П.П., Ліпук М.С. Перехід від монолітної до мікросервісної архітектури: апаратні методи впровадження. У статті розглядається проблема переходу від монолітної архітектури до мікросервісної з розподіленими базами ... (200 слів)
Ключові слова: монолітна архітектура, ... (5-10 слів)

Kovalets V., Zolotar O., Suliy P., Lipuk M. Transition from Monolithic to Microservice Architecture: Hardware Implementation Methods. The article addresses the problem of transitioning ......
Keywords: monolithic architecture, ...

Постановка наукової проблеми. У сучасному світі інформаційних технологій, де системи постійно розвиваються та ускладнюються, питання ефективної архітектури та управління даними стає все більш актуальним.

Таблиця 1. Характеристики мікроконтролерів та апаратних шифраторів

Параметр	Криптографічні бібліотеки	Апаратні шифратори
Продуктивність	Помірна, залежить від потужності мікроконтролера	Висока, завдяки спеціалізованому обладнанню

Крім імпульсів керування транзисторів інвертора мікроконтролер виробляє імпульси керування транзистора VT37. Завдання транзистора VT37 полягає у підключенні гальмівного резистора R33 паралельно конденсатору фільтра C31 (рис. 2).

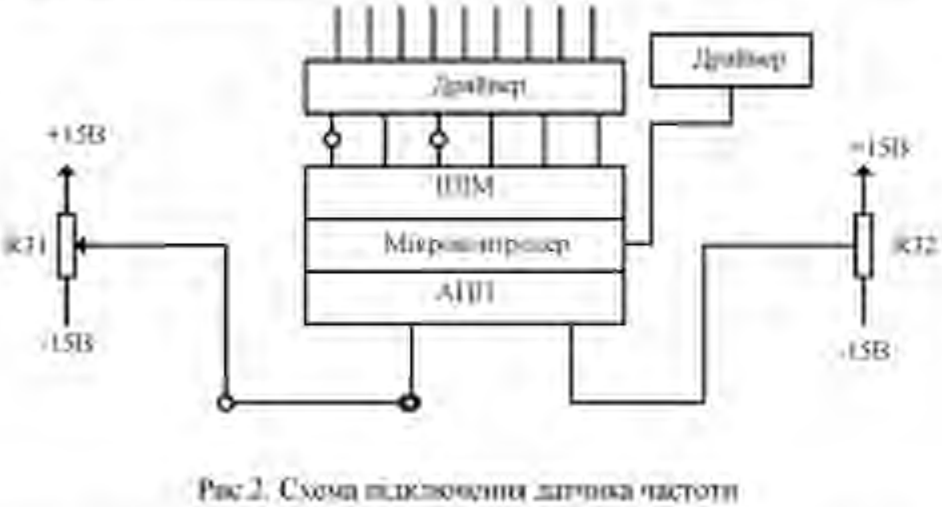


Рис.2. Схема підключення датчика частоти

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У даній статті було розглянуто проблему переходу від мікро-архітектури системи команд до мікро-архітектури спрощених вказівок...

Список бібліографічного опису:

1. Долгов О. М. Композиційні матеріали. Дніпро: Дніпр. політехніка. 2022. 67 с. URL: http://surl.li/swvwq (дата звернення: 16.03.2024).
2. Марчук В. Алгоритм оцінювання якості 3D моделі для адитивного виробництва. Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2023) : 3б. наук. пов. міжнар. конф., м. Луцьк, 16–18 трав. 2023 р. Луцьк. 2023. С. 178–180. URL: http://surl.li/swvge (дата звернення: 02.09.2024)

References:

1. Dolgov O. M. Composite materials. Dnipro: Dnipro. polytechnic. 2022. 67 p. URL: http://surl.li/swvwq (access date: 16.03.2024 y.
2. Marchuk V. 3D model quality assessment algorithm for additive manufacturing. Materials and technologies in engineering (MTI-2023): Collection. of science add. international conference. Lutsk, May 16–18, 2023. Lutsk, 2023. P. 178–180. URL: http://surl.li/swvge (access date: 02.09.2024).

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

КОЛЕКТИВ АВТОРІВ

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО

Науковий журнал

Комп'ютерний набір та верстка: Наталія ХРИСТИНЕЦЬ

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення
як суб'єкт у сфері друкованих медіа
(рішення №40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа R30-02456)
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Підп. до друку 21.06.2025. Формат А4. Папір офс
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 15.25 Обл.- вид. арк. 15.75
Тираж 20 прим. Зам. № 14/25

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна. м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.