

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 1 (27), 2024

No. 1 (27), 2024

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2024

Kharkiv
2024

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодянский Євгеній Володимирович,
д-р техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артіух Роман Володимирович, канд. техн. наук, професор;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович, д-р техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопсєнко Віктор, д-р техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Лемешко Олександр Віталійович, д-р техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р екон. наук, професор;
Музыка Катерина Миколаївна, д-р техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир, д-р техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р техн. наук, професор;
Семенов Сергій, д-р техн. наук, професор (Польща);
Сєтлак Галина, д-р техн. наук, професор (Польща);
Тєрзіян Ваган Якович, д-р техн. наук, професор (Фінляндія);
Тєлєтов Олександр Сергійович, д-р екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopeyenko Victors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Olexsandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenov Serhii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremaska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
<https://journals.uran.ua/itssi>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Волк М. О., Гора М. В.**
Модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах (ua)
- 18 **Гавриленко О. В., М'який М. Ю.**
Аналіз спільнот і груп у соціальних мережах як значущого фактора впливу на курси криптовалют (en)
- 26 **Гобов Д. А., Шевченко Н. Ю.**
Визначення архітектури вимог до IT-рішення як бізнес-аналітичного продукту (ua)
- 39 **Дудар З. В., Літвін С. Г.**
Метод онтологічного опису в побудові сервіс-орієнтованих систем розподіленого навчання (ua)
- 54 **Журило О. Д., Ляшенко О. С.**
Архітектура та системи безпеки IoT на основі туманних обчислень (ua)
- 67 **Замрій І. В., Шахматов І. О.**
Підвищення безпеки вебзастосунків з допомогою інноваційних патернів інтеграції штучного інтелекту (ua)
- 81 **Козирєв А. Д., Шубін І. Ю.**
Метод лінійно-логічних операторів та логічних рівнянь у завданнях видобування інформації (ua)
- 96 **Матвієнко О. І., Закутній С. В.**
Нечітка логіка в задачах визначення економічних параметрів виконання проєктів (ua)
- 109 **Мацелюх Ю. Р., Литвин В. В.**
Аналіз пасажирських перевезень та вплив громадського транспорту на скорочення викидів вуглецю в розумному місті (ua)
- 128 **Мінухін С. В., Коптілов Н. С.**
Метод збільшення продуктивності Apache Spark на основі сегментування даних і налаштувань конфігураційних параметрів (ua)
- 140 **Нарожний В. В., Харченко В. С.**
Метод семантичної кластеризації з використанням інтеграції вдосконаленого алгоритму LDA й алгоритму BERT (ua)
- 154 **Невлюдов І. Ш., Євсєєв В. В., Максимова С. С., Клименко О. М.**
Реалізація алгоритмів "балансування навантаження" та "адаптивне виконання завдань" на фармацевтичному сортувальному конвеєрі (en)
- 164 **Терещенко Г. Ю., Кириченко І. В.**
Аналіз і обґрунтування використання наявних блокчейн-рішень для захисту цифрових активів (ua)
- 179 **Федорович О. Є., Малєєв Л. В.**
Онтологічна модель структури та параметрів компонент високотехнологічних виробів у проєктах їх модернізації (ua)
- 192 **Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Філіпенко І. В., Корнієнко В. Р., Рожнова Т. Г.**
Автоматизоване проєктування вбудованих систем цифрового оброблення сигналів на платформі SoC (ua)

Сучасні технології управління підприємством

- 204 **Матківська Х. С., Зачко О. Б.**
Моделі цифровізації систем HR-менеджменту безпеко-орієнтованих організацій (ua)
- 215 **Черняк О. М., Багаєв І. О., Катрич О. О., Теслов О. А., Косиченко О. М., Шевченко В. П.**
Визначення мінімальної кількості періодів для оцінювання індексів сталого розвитку країн ЄС методами порядкових статистик (ua)
- 226 **Черняк О. М., Фатєєва Л. Ю., Яковлев М. Ю., Рибальченко Т. П., Зась Д. С., Кузнєцов В. Д.**
Оцінювання якості системи управління безпекою праці відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018 на етапі функціонування (ua)

Телекомунікаційні системи та комп'ютерні мережі

- 236 **Ащєнков В. О.**
Використання моделі Isolation Forest для виявлення аномалій у даних вимірювань (ua)
- 246 **Когдась М. Г.**
Дослідження адсорбції молекул побутового газу на електрофізичні властивості поруватого кремнію (ua)
- 256 **Алфавітний показник**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Volk M., Hora M.**
A modified method of self-recovery of distributed software in heterogeneous computer systems (ua)
- 18 **Gavrilenko O., Myagkyi M.**
Analysis of communities and groups in social networks as a significant factor of influence on cryptocurrency rates (en)
- 26 **Gobov D., Shevchenko N.**
Definition of the requirements architecture for IT solution as a business analytics product (ua)
- 39 **Dudar Z., Litvin S.**
Ontological description method for building service-oriented distributed learning systems (ua)
- 54 **Zhurylo O., Liashenko O.**
Architecture and iot security systems based on fog computing (ua)
- 67 **Zamrui I., Shakhmatov I.**
Enhancing the security of web applications through innovative patterns of integration of artificial intelligence (ua)
- 81 **Kozyriev A., Shubin I.**
The method of linear-logical operators and logical equations in information extraction tasks (ua)
- 96 **Matviienko O., Zakutnii S.**
Fuzzy logic in the problems of determining the economic parameters of project implementation (ua)
- 109 **Matseliukh Y., Lytvyn V.**
Analysis of passenger transportation and the public transportation impact on the reduction in a smart city (ua)
- 128 **Minukhin S., Koptilov N.**
A method to enhance Apache Spark performance based on data segmentation and configuration parameters settings (ua)
- 140 **Narozhnyi V., Kharchenko V.**
Semantic clustering method using integration of advanced LDA algorithm and BERT algorithm (ua)
- 154 **Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Klymenko O.**
The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line (en)
- 164 **Tereshchenko G., Kyrychenko I.**
Analysis and justification of the use of existing blockchain solutions for the protection of digital assets (ua)
- 179 **Fedorovych O., Malieiev L.**
Ontological model of structure and parameters of components in high-tech product modernization projects (ua)
- 192 **Shkil A., Rakhlis D., Filippenko I., Korniienko V., Rozhnova T.**
Automated design of embedded digital signal processing systems on SOC platform (ua)

Modern Enterprise Management Technologies

- 204 **Matkivska K., Zachko O.**
Models of digitalization of hr management systems in security-oriented organizations (ua)
- 215 **Cherniak O., Bahaiev I., Katrych O., Teslov O., Kosychenko O., Shevchenko V.**
Determination of the minimum number of periods for assessing the sustainable development indices of the EU countries using the methods of ordinal statistics (ua)
- 226 **Cherniak O., Fatieieva L., Yakovlev M., Rybalchenko T., Zas D., Kuznietsov V.**
Assessment of the quality of the labour safety management system in accordance with the requirements of the international standard ISO 45001:2018 at the stage of operation (ua)

Telecommunication Systems & Computer Network

- 236 **Aschepkov V.**
The use of the Isolation Forest model for anomaly detection in measurement data (ua)
- 246 **Kogdas M.**
Study of adsorption of household gas molecules on electrophysical properties of porous silicon (ua)
- 256 **Alphabetical index**

УДК 004.75:004.453.3

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.005>

М. Волк, М. Гора

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД САМОВІДНОВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ГЕТЕРОГЕННИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Об'єктом дослідження є розподілений обчислювальний процес у гетерогенних комп'ютерних системах. **Предметом** – методи самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. **Мета роботи** – підвищення ефективності систем розподіленого оброблення даних із підтримкою функціональної стійкості обчислювального процесу з допомогою розроблення модифікованого методу самовідновлення розподіленого програмного забезпечення. **Завдання:** дослідити наявні методи відновлення розподіленого обчислювального процесу, зробити висновки про їх переваги та недоліки; на основі математичних моделей завдань, обчислювальних ресурсів і наявних методів розподілу ресурсів розробити модифікацію методу самовідновлення розподіленого програмного забезпечення, беручи до уваги стратегії управління, пошук найкращого рішення для обраних критеріїв, зменшення енергоспоживання під час виконання завдань; провести низку експериментів з порівняння розробленого методу з наявними. **Методи дослідження** ґрунтуються на використанні теорії множин, загальної теорії систем і теорії імітаційного моделювання. **Результати експериментів**, досягнуті в умовах моделювання розподілу програмних завдань на обчислювальні ресурси в імітаційному середовищі моделювання та симуляції обчислювального процесу під час самовідновлення в разі відмов ресурсів, підтверджують ефективність запропонованого методу. Відповідно до результатів дослідження можна зробити **висновки** про те, що застосування методу в системах управління розподіленими обчисленнями не збільшує час, який система витрачає на виконання завдання за відсутності відмов, водночас за наявності відмов дає змогу швидше відновити функціональність програмного завдання та зменшує час виконання на 8–17%, а енергоспоживання на 7–12%. Також спостерігається зростання ефективності зі збільшенням розмірності завдань та ймовірності відмов. Напрямами майбутніх досліджень можна визначити розроблення технологій автоматизованого або автоматичного використання методів розподілу ресурсів і самовідновлення.

Ключові слова: методи самовідновлення; програмне забезпечення; розподілені обчислення; комп'ютерні системи; хмарні архітектури; програмні агенти.

Вступ

Сучасні комп'ютерні системи, що підтримують самовідновлення в аварійних ситуаціях, зараз стають усе більш популярними. Це зумовлено тим, що організації та підприємства все частіше впроваджують автоматичні технології та засоби для своєї роботи. У цьому разі бажано мінімізувати час використання та простою техніки та зменшити елементи втручання людини в сам обчислювальний процес. Одним із механізмів, які підтримують функціонування таких систем, є самовідновлення програмного забезпечення, що підвищує надійність і продуктивність обчислень.

Наявні методи самовідновлення ґрунтуються на резервуванні надлишкових ресурсів, контролі та відтворенні програм і даних. Вони гарантують працездатність системи та повернення її до робочого стану після будь-яких відмов. У разі виходу з ладу програмного компонента засоби самовідновлення можуть автоматично перенаправляти трафік на інші

програми в мережі для підтримки продовження обслуговування користувачів. Водночас система сама знаходить новий обчислювальний ресурс і відновлює функціонування програмної системи.

Нині відомо декілька підходів щодо відновлення програмних систем після збоїв. Вони часто використовують такі методи [1–3]:

- перезавантаження, зокрема перезапуск усього програмного забезпечення;
- оновлення програмного забезпечення;
- мікроперезавантаження, що повертають систему до робочого стану до або після виявлення несправності.

Перезапуск програмного забезпечення зазвичай потребує значного часу, що призводить до простою програмної системи, за умов якого система не відповідає на запити та створюється ефект зависання системи загалом.

Оновлення програмного забезпечення використовує динамічне ресурсне середовище та може передбачати

елементи зміни програми для врахування причин збоїв у нормальній роботі.

Мікроперезавантаження зазвичай працюють швидше та призводять до перезапуску окремих компонентів програмної системи. Такий підхід вимагає аналізу стану програми в момент відмови для розуміння причин відмови.

Основна проблема сучасних методів відновлення функціональної стійкості полягає в значній вартості цього процесу, яка зростає зі збільшенням вимог до часу відновлення. Крім цього, методи, зорієнтовані на зменшення часу відновлення, зазвичай не беруть до уваги обмеження на енергоспоживання, вартість та ефективно використання ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи відкату до контрольної точки [4] використовуються подібно до перезапуску програми, але водночас забезпечують менший час перезапуску, тому що він виконується з контрольної точки відновлення. У разі такого використання все ще не обробляються окремі помилки, оскільки вони все одно можуть виникати в подальшому.

Існують інші варіанти застосування точки відновлення в поєднанні з виконанням декількох версій програми [5], які враховують детерміновані помилки, якщо відмови відбуваються незалежно одна від одної. Однак вони визначаються значними витратами для програмних систем щодо розроблення, моніторингу, резервування надлишкових ресурсів та виконання кількох версій однієї програми одночасно на різних ресурсах.

Методи автоматичної генерації сигнатур для систем динамічного виявлення та захисту від вразливостей вторгнень [6, 7] фільтрують вхідні дані з метою відсіювання атак. Ключовою проблемою є те, що такі сигнатури можуть спричинити помилкові спрацьовування, особливо в разі поліморфних атак. Показано, що така атака надто різноманітна, щоб її можна було виявляти за допомогою сигнатур [8].

Наступний проект, що застосовує механізм перезапуску з точки відновлення, – це *Rx* [9], який містить механізми зміни середовища виконання завдання заради мети відновлення після помилок. Але в роботі [10] показано, що значна кількість помилок програм не залежить від середовища виконання, а самі помилки є повністю детермінованими й можуть повторюватися. У такому разі відновлення

будуть успішними лише за умови використання методів, які закладені в саму програму та реагують на сутність помилки.

Зміна середовища в *Rx* виявилась неефективною через поліморфну поведінку шкідливих запитів [11]. Крім того, *Rx* намагається замаскувати несправності для клієнта, але використовує проксі-сервер застосунку з підтримкою протоколів, що мають бути здатними фільтрувати специфічну інформацію (зокрема часові мітки), яка може заплутати клієнтську програму. Також *Rx* не вирішує проблеми узгодженості за умови встановлення контрольних точок і перезапуску програм, що містять кілька процесів.

Технологія використання "прибиральника" (*Sweeper*) [12] комбінує механізми перезапуску контрольної точки *Rx* і проксі зі специфічними для вразливостей фільтрами виконання (*VSEF*). У разі помилки *Sweeper* аналізує "хибні дані", щоб визначити інформацію на вході, яка призвела до збою, генерує вхідний фільтр для виявлення подібних майбутніх інформаційних запитів, а потім повертає систему до попередньої контрольної точки та поновлює отримання вхідних даних.

Існують підходи до організації обчислень, орієнтовані на "прийнятність" (*acceptability*) [13]. Вони просують ідею про те, що поточні зусилля з розроблення програм можуть бути неправильно виконаними. Такий підхід ґрунтується на тому факті, що деякі частини програми можуть бути заблокованими без негативного впливу на загальну функціональність системи.

Комп'ютерні обчислення без збоїв [14] є спекулятивною технікою відновлення, що основана на використанні компіляторів реального часу виконання та вимагає ін'єкцію в програмний код для роботи із записами в оперативній пам'яті з допомогою додаткового віртуального буфера. Такий процес забезпечує більш надійну реакцію на помилки, незважаючи на значні накладні витрати на продуктивність, які можуть досягати від 80 % до 500 % для різних програм.

Ще одною спекулятивною технікою відновлення є вибіркова транзакційна емуляція, яка використовується в програмних імунних системах [15]. Вона виявляє функцію, у якій відбулася помилка, а потім частково симулює процедуру реалізації цієї функції, можливо, в більшому діапазоні даних, щоб отримати значення помилок. Підхід застосовує віртуалізацію помилок, щоб визначити евристичне значення помилки в програмній процедурі, у якій вона виникла.

Детальний, формалізований підхід щодо відновлення розподіленого програмного забезпечення наведено в роботах [16, 17], де з використанням моделей програмних компонентів виконується управління станом програмних компонентів у часі за допомогою дамів пам'яті або журналізації зміни даних. Застосування цього підходу до завдань нашого дослідження дасть змогу організувати самовідновлення на низькому програмному рівні (рівні операційної системи, віртуальної машини тощо).

Унаслідок аналізу можна зробити висновок, що жоден із цих методів не є оптимальним. Ці методи зазвичай неефективно долають потік помилок, збоїв та відмов, що призводить до значних витрат на відновлення.

Мета й завдання роботи

Метою роботи є підвищення ефективності підтримки функціональної стійкості гетерогенних комп'ютерних систем завдяки розробленню та впровадженню модифікованого методу самовідновлення програмного забезпечення. Для досягнення мети в роботі виконуються такі завдання: розглядається

модель розподіленого обчислювального процесу (РОП) та структура обчислювального середовища виконання; формалізуються стратегії управління РОП; пропонується метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах та аналізуються результати досліджень розробленого методу.

Модель системи управління розподіленим обчислювальним процесом і стратегії управління

Система управління обчислювальним процесом зазвичай є децентралізованою та має різні компоненти. Пакети завдань та середовище виконання містять безліч програм і комп'ютерних елементів, на яких ці програми виконуються. Методи розподілу, моніторингу, підтримки функціональної стійкості – це окремі програми або програмні системи, якими керує система управління для виконання визначених цілей (рис. 1). Зеленим кольором виділено програмні модулі та методи забезпечення, що впроваджені в процес самовідновлення РОП та потребують зміни для фінальної реалізації системи управління.

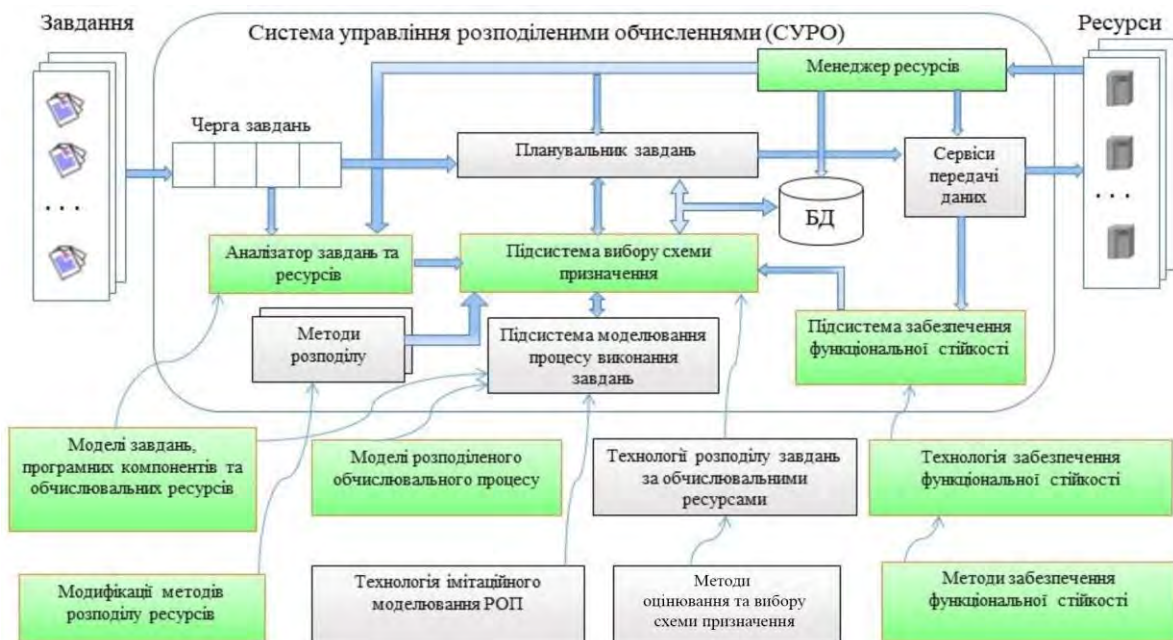


Рис. 1. Структура системи управління розподіленими обчисленнями

За основу подання системи управління розподіленим обчислювальним процесом застосуємо моделі, запропоновані в роботі [18]:

$$\Omega = \langle Z, R, Mg, Sh, Q, Sy, Ms \rangle, \quad (1)$$

$$O = \{ \overline{T}_j, \overline{TR}_j, \overline{TP}_j, \overline{Vz}_j, \overline{Yz}_j, \overline{E}_j, \overline{C}_j \}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де Ω – множина елементів системи управління РОП, яка містить такі компоненти: Z – множина

програмних пакетів завдань, що виконує система; R – множина наявних обчислювальних ресурсів; Mg – сервіси моніторингу системи; Sh – множина схем призначення завдань за ресурсами; Q – множина методів розподілу ресурсів; Sy – сервіси синхронізації; Ms – множина методів самовідновлення; O – множина параметрів, що в кількісному вигляді позначають критерії ефективності РОП: T – час виконання завдання; TR і TP – час роботи та простою ресурсів; Vz – обсяги оперативної пам'яті, яку використовують завдання; Yz – характеристики зв'язності програм у завданні; E – енергоспоживання в процесі виконання завдання; C – відносна вартість виконання завдання; N – загальна кількість завдань.

Вибір сукупності оцінювальних параметрів та елементів системи керування залежить від стратегії управління РОП. Наведемо приклади деяких найбільш поширених стратегій керування та формалізуємо їх.

Стратегія 1. Мінімізувати час виконання завдання за умови обмежень на обсяги пам'яті та час простою ресурсів:

$$St_1 = \begin{cases} TR = f(Sh(Q, Z, R), Sy, Ms) \rightarrow \min \\ TP \in [0, TP_{\max}] \\ V \in [0, V_{\max}] \end{cases} \quad (3)$$

Перша стратегія передбачає використання функції f на просторі об'єктів, до яких належать схеми розподілу Sh , отримані за допомогою методів розподілу ресурсів Q на основі моделей завдання Z та обчислювальних ресурсів R , методів синхронізації програм Sy та методів підтримки функціональної стійкості Ms . Мета функції – задіяти перелічені об'єкти щодо досягнення мінімуму часу виконання завдання. Отримані конфігурації розподілу завдань за ресурсами перевіряються на входження в границі обмежень відповідно до простою та обсягів пам'яті ресурсів, а якщо можна, і мінімізувати їх.

Стратегія 2. Мінімізувати час виконання завдання за умови наявності безлічі методів розподілу та засобів забезпечення функціональної стійкості обчислювального процесу:

$$St_2 = \begin{cases} TR = f(Sh(Q, Z, R), Sy, Ms) \rightarrow \min \\ Z = const, R = const \\ Q \neq const \end{cases} \quad (4)$$

Стратегія передбачає використання функції f на просторі тих самих об'єктів (1, 2), але за умови незмінності обчислювальних завдань та комп'ютерних

ресурсів і наявності множини методів розподілу ресурсів, вибір з яких неоднозначний.

Стратегія 3. Мінімізація вартості виконання завдання на безлічі доступних ресурсів:

$$St_3 = \begin{cases} C = f(Sh(Q, Z, R), Sy, Ms) \rightarrow \min \\ Q \neq const, R \neq const \\ Z = const \end{cases} \quad (5)$$

Стратегія передбачає використання функції f на просторі тих самих об'єктів (1, 2), але метою функції є мінімізація вартості процесу обчислень.

Стратегія 4. Мінімізація часу відновлення обчислювального процесу:

$$St_4 = \begin{cases} T_{Ms} = f(Sh(Q, Z, R), Sy, Ms) \rightarrow \min \\ Z = const; R \neq const \\ Q \neq const; Sh \neq const; Ms \neq const; Sy \neq const \end{cases} \quad (4)$$

Ця стратегія важлива для критичних обчислень реального часу, коли необхідно якнайшвидше відновити роботу комп'ютерної системи. Але її реалізація зазвичай призводить до дорогих, затратних рішень.

Стратегія 5. Мінімізувати кількість обчислювальних ресурсів з огляду на обмеження на пам'ять та можливість вибору методу синхронізації:

$$St_5 = \begin{cases} |P| = f(Z, R, Sh, Q, V, Sy, Ms) \rightarrow \min \\ Z = const; R = const; TP \rightarrow \min; V \rightarrow \min \\ Ms \neq const; Sy \neq const \end{cases} \quad (5)$$

Зазначена стратегія передбачає використання функції f на просторі об'єктів, до яких належать схеми розподілу Sh , методи розподілу ресурсів Q , моделі завдань Z та обчислювальних ресурсів R , методів підтримки функціональної стійкості Ms . Мета функції – задіяти перелічені об'єкти для досягнення мінімуму потужності множини ресурсів R , які буде використано. Якщо існує декілька рішень, система намагатиметься мінімізувати час простою та обсяги фізичної пам'яті.

Важливо зауважити, що реалізація функції f будуватиметься для кожної стратегії окремо, може бути математичною, евристичною або програмною та містити деякі спільні алгоритми обчислень. Імовірно, що стратегій виконання більше, тоді їх реалізація може бути виконана як засобами адміністрування (в автоматичному, автоматизованому або ручному), так і з допомогою розроблення додаткового програмного забезпечення. Одним

із способів реалізації є створення скриптів або використання XML-подібної мови розмітки.

Запропонуємо ще одну стратегію, мета якої – мінімізувати енергоспоживання на виконання завдання:

$$St_E = \begin{cases} E = f(Z, R, Sh, Q, Ms) \rightarrow \min; \\ Z = \text{const}; R \neq \text{const}; \\ TP \rightarrow \min; Ms \neq \text{const} \end{cases} \quad (6)$$

Стратегія передбачає використання функції f на просторі об'єктів, до яких належать схеми розподілу Sh , методи розподілу ресурсів Q , моделі завдань Z та обчислювальних ресурсів R , методів підтримки функціональної стійкості Ms . Мета функції – задіяти перелічені об'єкти для досягнення

мінімуму споживання енергії ресурсами з множини R , які буде застосовано для виконання завдання Z .

У процесі розподілу обчислювальних ресурсів у запропонованому методі використовується ідея методу зграї сальп (англ. *Salp Swarm Algorithm, SSA*), запропонованого в статті [19]. Зазначений метод виконує симуляцію зграйної поведінки сальп під час переміщення в океані та добування їжі. Ключова особливість поведінки сальп, що становить інтерес для цієї роботи, – вибудовування зграї як ланцюжка для досягнення цільової функції (у сальп – це їжа, в роботі – агент). Основні кроки алгоритму, який застосовується, зображено на рис. 2.

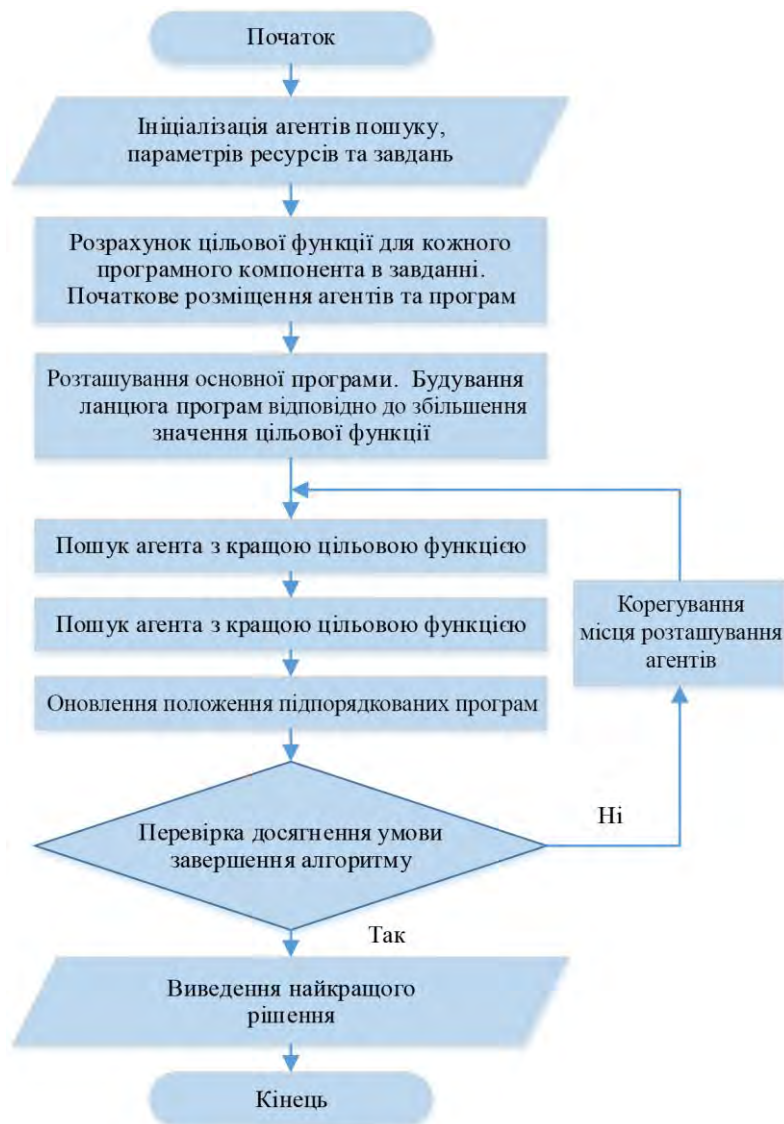


Рис. 2. Основні кроки алгоритму розподілу обчислювальних ресурсів

Алгоритм починає процес розподілу з розміщення в просторі агентів випадковим чином. Для кожного

агента обчислюється цільова функція, обирається агент із кращим значенням, і положення агента

позначається як "джерело їжі", за яким половатиме ланцюжок агентів. За ресурсом, де розташований цей агент, закріплюється основна програма.

Для кожної зграї (завдання) оновлюється позиція основної та підпорядкованих програм. Положення основної програми оновлюється, коли ланцюжок з програм завдання знаходить положення з найкращим значенням цільової функції. Ланцюжок має тенденцію руху в бік глобального оптимуму, що може змінювати своє положення під час оптимізації. На етапі корегування положення програм можлива перевірка встановлених обмежень.

Переваги алгоритму [20]:

– алгоритм зберігає найкраще поточне значення, що не буде втрачено навіть у разі виродження всієї популяції;

– алгоритм оновлює положення провідної програми щодо агента, який відповідає кращому знайденому на поточну мить рішенню; у такий спосіб основна програма здійснює розвідку та пошук;

– алгоритм оновлює положення підпорядкованих програм одна щодо одної, тому вони поступово зміщуються в бік основної програми;

– поступове переміщення підпорядкованих програм запобігає зупиненню алгоритму в точці локального оптимуму;

– алгоритм простий у реалізації та застосуванні.

Переваги алгоритму дають змогу вирішити оптимізаційну задачу як з визначеним, так і невідомим простором пошуку. Алгоритм є адаптивним, що дозволяє уникнути локальні рішення й досягти глобального оптимуму.

У разі отримання декількох рішень система спрямована на мінімізацію часу простою, що зменшує енергоспоживання.

У розробленому методі сальп має бути програмою, що шукає кращий ресурс, але програма не може зробити це самостійно. Тому необхідно розглядати сальп як комбінацію статичного агента, що отримує інформацію про обчислювальний ресурс, і програму, прив'язану до агента. На етапі планування програма може бути прив'язана до агента віртуально, на рівні логічного зіставлення або схеми призначення Sh . А після завершення алгоритму планування програма передається агенту на виконання.

Отже, агент виконує чотири функції:

а) збір та передача інформації про обчислювальний ресурс;

б) отримання та розгортання програмного компонента на виконання;

в) підтримка зв'язку між програмними компонентами та системою управління;

г) виявлення відмови програмного компонента та підтримка функціональної стійкості.

Розглянемо етапи метаевристичного методу розподілення завдань за обчислювальними ресурсами в умовах динамічної зміни ресурсів та підтримки функціональної стійкості.

Етап 1. Отримання пулу завдань $Z = \bigcup_{i=1}^N P_i$,

де N – загальна кількість програм у завданні та нормованих характеристик програм у завданні $X^P = \langle E_i^P, T_i^P, V_i^P, Y_i^P, \rho_i^P \rangle$, вибір цільової функції $f(x^P)$, де $x^P \in X^P$, та одного або декількох обмежувальних параметрів $X_{\text{lim}}^P \subset X^P$.

Етап 2. Отримання доступного пулу ресурсів

$R = \{R_j\}$, $j = \overline{1, M}$, та якісної інформації про ресурси та нормовані характеристики ресурсів X^R . За відсутності можливості отримати характеристики, необхідно доручити це агентам на наступних етапах.

Етап 3. Розсилання агентів $A = \{A_j^{R_j}\}$, $j = \overline{1, M}$

на ресурси R . Атрибут R_j агента $A_j^{R_j}$ підкреслює гетерогенність комп'ютерного середовища, коли ресурсу потрібен оригінальний агент. Якщо ресурси однорідні, достатньо одного типу агента – A_j^R або A_j .

Етап 4. Перевірка умови наявності достатньої кількості ресурсів. Умовою може бути кількість агентів, що відповіли, час, що минув з початку розсилання агента. Якщо на етапі 2 було отримано значення характеристик ресурсів, умовою початку алгоритму розподілу може бути $\sum_{i=1}^N x_i^P \geq \sum_j^M x_j^R$, що означає наявність достатньої кількості ресурсів для виконання пулу завдань.

Етап 5. Створення випадкової схеми розподілення ресурсів $Sh = \{P \xrightarrow{\theta} R\}$. Випадкова функція θ може бути реалізована таким чином. У разі співвідношення потужності множин $|P| \leq |R|$ один програмний компонент з множини P закріплюється за вільним ресурсом з множини R випадковим способом. Найбільш простим та швидким буде виконання алгоритму $P_i \longrightarrow R_i$, $N \leq M$. За умови $|P| > |R|$ можна дочекатися появи

додаткових ресурсів або розподілити залишкові програмні компоненти рівномірно на наявні ресурси з обмеженнями X_{lim}^P). Сортування одночасно векторів P та R за зростанням значень відношень $f(x_i^P)/f(x_i^R)$. Унаслідок розподілу можна виділити дві підмножини ресурсів: R' – задіяних у розподілі та R'' – незадіяних у розподілі ресурсів. Тобто більш коректна схема призначення відображає $Sh = \{P \xrightarrow{\theta} R'\}$. Формування матриць Φ , Φ' . На першій множині P після сортування розташовуватиметься основна програма, яка знайшла найбільш потужний ресурс за критерієм оптимізації.

Необхідно відокремити паралельний процес пошуку нових ресурсів, що паралельно з основним методом буде виконувати дії, аналогічні наведеним в етапах 2 і 3, з розширенням множин R та X^R і матриць Φ , Φ' .

Етап 6. Оновлення підмножини ресурсів $R'' \subset R$, $R'' \cap Sh = \emptyset$, які не задіяні в розподілі та для яких визначені параметри цільової функції. Якщо $R'' = \emptyset$, то відбувається перехід до етапу 8. Для всіх ресурсів із множини R'' необхідно визначити значення цільової функції $f(x_i^{R''})$, $i = \overline{1, |R''|}$. Знайти ресурс, що надає мінімальне значення відношення цільової функції для основної програми до цільової функції ресурсу $\min(f(x_i^P)/f(x_i^{R''}))$, $i = \overline{1, |R''|}$, запам'ятовування ідентифікатора отриманого ресурсу i' . Якщо отримане мінімальне значення перевищує або дорівнює аналогічному відношенню для ресурсу, на якому зараз розташована основна програма, відбувається перехід до етапу 8.

Етап 7. Перевірка виконання обмежень параметрів множини $X_i^{R''}$. Якщо обмеження не виконуються, вилучення з множини R'' ресурсу R_i'' : $R'' = R'' - R_i''$ без можливості долучення в розподіл знову. Долучення можливе за умови зміни обмежувальних характеристик. Якщо вилучення відбулося, здійснюється перехід до етапу 6. Якщо вичерпано час, відведений на пошук ресурсів, можна переходити до етапу 8.

Етап 8. Зміна прив'язки програм до ресурсів із формуванням нової схеми призначення $Sh = \{P_1 \longrightarrow R_i' \cup P_i \longrightarrow R_{i-1}'\}$, $i = \overline{2, N}$. Корегування множини задіяних ресурсів $R' = R' - R_{i-1}' + R_i'$.

Корегування матриць відповідності програм до ресурсів. Перехід до етапу 6.

Етап 9. Ущільнення розподілу ресурсів в умовах розміщення кількох програм на одному ресурсі. Для кожної програми, за винятком основної $\forall P_i$, $i = \overline{2, N}$, перевіряється можливість розміщення на ресурсах, які розташовані до неї в схемі призначення. Переміщення можливе в разі виконання двох умов.

Перша – це сумарне оцінювання відношень цільових функцій програми та ресурсу для одного ресурсу j :

$$\sum_{i=0}^{N_{R_j}} \frac{f(x_i^P)}{f(x_j^{R'})} \leq 1, \quad (7)$$

де N_{R_j} – кількість програм, розподілених на ресурс j .

Друга умова – сумарне виконання обмежувальних функцій $X_j^{R'}$.

Сортування одночасно векторів P та R відповідно до зростання значень відношень $\frac{f(x_i^P)}{f(x_i^R)}$.

Етап 10. Передача схеми призначення менеджру Mg для ініціалізації процесу розподілених обчислень.

Після завершення етапу 10 починається процес виконання завдань. Агенти, продовжуючи сканування ресурсів, починають обслуговувати обмін даними між програмами завдань, підтримуючи функції RTI .

Паралельно з цим менеджер починає виконання функцій підтримки функціональної стійкості з реалізацією наступних етапів методу.

Етап 11. Запуск і контроль процесу виконання завдань.

Етап 12. Зберігання даних програми одним методом (або множиною методів). Менеджер періодично отримує стан програмних компонент і передає його модулю відновлення, який зберігає стан програмних компонент у момент часу t_q .

Етап 13. Проведення моніторингу вільних ресурсів R^e , виявлення нових обчислювальних ресурсів, на які можливо перерозподілити програмні компоненти.

Етап 14. Виявлення відмов або збоїв програм чи ресурсів, формування множини P_{Err} .

Етап 15. Якщо відмов не виявлено ($P_{Err} = \emptyset$), відбувається перехід до етапу 19.

Етап 16. Передача множини програм для відновлення P_{Err} та вільних ресурсів R^e від менеджера до модуля відновлення: $Mg(R^e, P_{Err}) \Rightarrow Ms(R^e, P_{Err})$.

Етап 17. Вибір множини нових ресурсів для виконання програм (створення нової схеми призначення): $Sh^{Err} = \{P^{Err} \rightarrow R^e\}$ з виконанням кроків, описаних у етапах 6–9 методу для програм із множини P_{Err} .

Етап 18. Модуль відновлення надсилає відповідний програмний компонент на обраний ресурс, за необхідністю компілює програму для обраної платформи виконання та відновлює стабільну роботу програми, для чого повертає її до стану, найближчому до часу відмови ресурсу.

Етап 19. Перевірка умов завершення процесу виконання завдань. Якщо процес продовжується, відбувається перехід до етапу 12.

Етап 20. Завершення етапу виконання завдань, передача та зберігання даних результатів і статистичної інформації про процес обчислень.

На рис. 3 запропонована діаграма дій, що зображує послідовність виконання етапів методу. Особливістю діаграми, порівняно з граф-схемою алгоритму, є відтворення етапів, що виконуються паралельно. У реалізації методу беруть участь декілька програмних сервісів підтримки розподілених обчислень, які працюють одночасно на різних обчислювальних ресурсах.

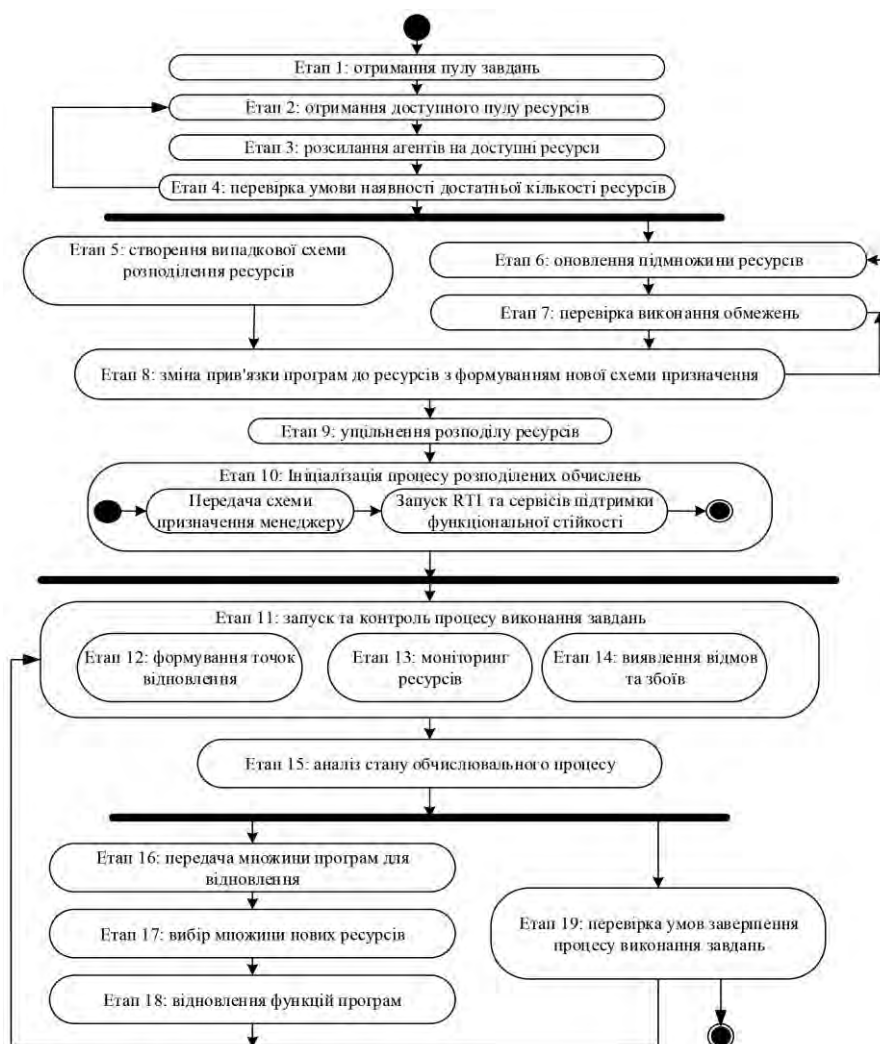


Рис. 3. Діаграма дій метаевристичного методу управління розподіленими обчисленнями

Так, паралельно із системою управління розподіленими обчисленнями виконуються такі сервіси: моніторинг ресурсів, аналізатор ресурсів

на відповідність обмеженням, формування точок відновлення (зберігає дані програми у визначеному моменті часу для відновлення), виявлення відмов

та збоїв, аналіз стану обчислювального процесу. Також у паралельному режимі в разі виявлення відмови однієї або декількох програм активується сервіс, що перерозподіляє програмні компоненти на нові ресурси, відновлює їх роботу за допомогою збережених даних у точках відновлення.

Також важливо зауважити, що сервіси, які забезпечують процеси розподілених обчислень, виконуються на віддалених комп'ютерних ресурсах та організують синхронізацію за допомогою обміну пакетами даних, який організується мережними засобами, засобами *RPI* або спеціально розробленими програмними компонентами.

Результати досліджень

Для моделювання розподілених обчислень у хмарних та гетерогенних системах часто використовують *WorkflowSim* [21], який є проектом із відкритим кодом, що дає змогу виконати порівняння розроблених методів з уже наявними та реалізованими в системі з метою оцінювання їх ефективності. У системі є декілька методів управління ресурсами та забезпечення функціональної стійкості розподілених систем. Для експериментів, що проводилися з метою перевірки корисності розроблених моделей, було обрано такі методи: *time-traveling virtual machine (TTVM)* [5], *instruction stream interrupt assumption (ISIA)* [6] та метод, який використовується в *Rx*-системах [13].

Система *WorkflowSim* дозволяє додати програмні компоненти, які містять нові методи та підсистеми.

На рис. 1 зеленим кольором позначені модулі, що зазнали модифікацій у зв'язку з упровадженням розробленого методу. Для імітації відмов ресурсів було розроблено модуль, який із вказаною ймовірністю виводив із діючих ресурсів один або декілька обчислювачів, після чого долучався один із методів самовідновлення.

В експериментах задіяно змінну кількість віртуальних машин і програмні завдання з різними характеристиками. Пакети завдань та ймовірнісні характеристики процесу РОП були ідентичні, щоб виконати порівняльний аналіз розробленого методу з наявними. Кількість завдань визначалася в діапазоні від 10 до 100, кількість програм у завданні – від 5 до 500, кількість задіяних віртуальних машин – 5–40, обсяг фізичної пам'яті кожної віртуальної машини – 8 Gb, обсяг зовнішньої пам'яті – 2Tb, гіпервізор *Xen*. Поток завдань та відмов генерувалися випадково, застосовувалися стандартні та розроблений методи для відновлення робочого процесу. Результати було усереднено на основі нормування в часі.

На рис. 4 наведено результати моделювання РОП у разі, коли відмови не відбувалися. З рисунка видно, що середній час виконання завдань, отриманий за допомогою запропонованого методу, кращий, ніж у методів *TTVM* та *ISIA*, і не значно перевищує час, отриманий для методу *Rx*. Крім того, із зростанням кількості завдань він наближається до методу *Rx*. Це свідчить про те, що запропонований метод не перевантажує систему управління під час нормальної роботи системи.

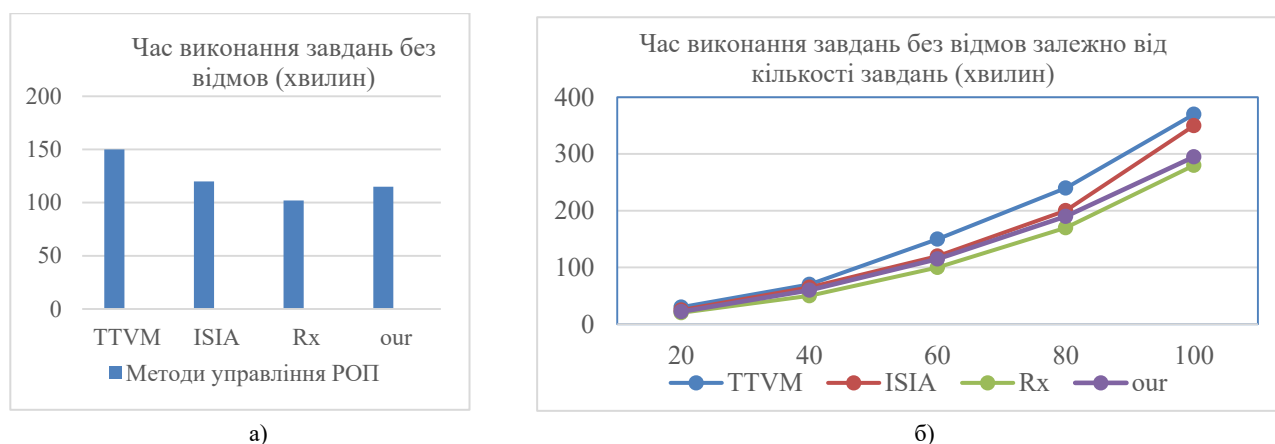


Рис. 4. Оцінка часу виконання завдань із застосуванням стандартних і запропонованого (*our*) методів самовідновлення: а) середній час виконання, б) час виконання залежно від кількості завдань

На рис. 5 зображено результати експериментів з оцінкою часу виконання завдань, коли з різною

ймовірністю η виникають відмови ресурсів, на яких виконуються програми. Дослідження вказує на

ефективність запропонованого методу за наявності відмов ресурсів, а саме зменшення загального часу обчислювального процесу. Самовідновлення стану виконання завдань виконується швидше, ніж у разі застосування стандартних методів.

Наприклад, для ймовірності відмови $\eta = 0.01$ зменшення часу виконання завдань становило 8 %, для $\eta = 0.02$ – 13 %, $\eta = 0.03$ – 17 %. Зі зростанням ймовірності відмов спостерігається збільшення відсотка економії часу проведення обчислень.

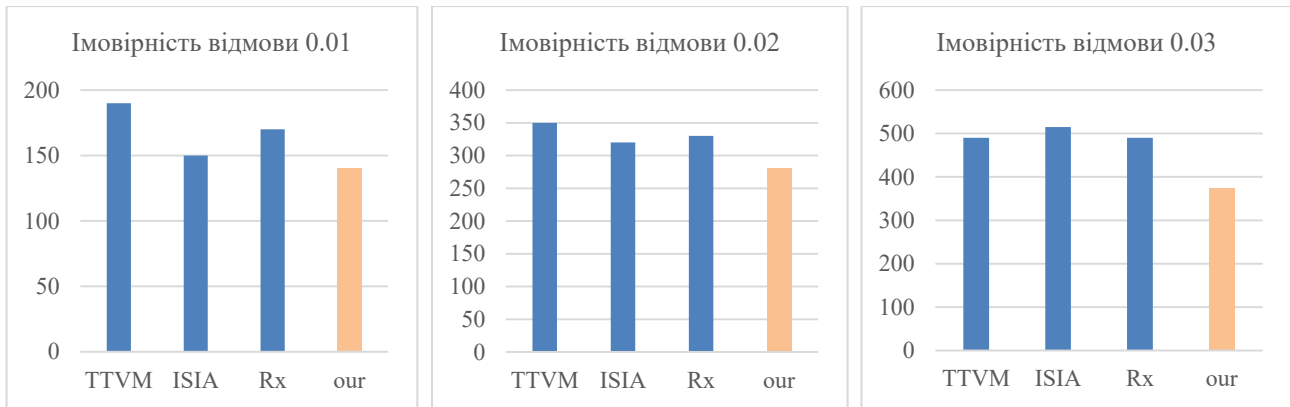


Рис. 5. Оцінка часу виконання завдань із застосуванням стандартних і запропонованого методів самовідновлення за умови різної ймовірності відмов ресурсів

На рис. 6 подані усередненні оцінки для споживання енергії. Для оцінювання енергоспоживання було використано моделі, запропоновані в роботі [18]. Ці моделі беруть до уваги параметри витрати енергії на обчислення, передачу та зберігання даних, синхронізацію

та простій ресурсів. Експерименти виконувалися за умов, розглянутих вище. Для отримання середніх значень ймовірність відмови визначалася для кожного експерименту випадково за рівномірним законом розподілу в діапазоні $\eta \in [0, 0.03]$.



Рис. 6. Оцінка споживання енергії в процесі виконання завдань із застосуванням стандартних і модифікованих моделей

Результати дослідження показують, що запропонований метод самовідновлення для забезпечення функціональної стійкості обчислювального процесу дає змогу зменшити споживання енергії. На відміну від застосування наявних методів, під час експериментів споживання енергії скорочується на 7–12 %. Є тенденція

збільшення відсотка енергоефективності за умови зростання розмірності завдань та ймовірності відмов.

Висновки

Запропонований модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення

дає змогу підвищити ефективність обчислювального процесу в розподілених комп'ютерних системах. Він оснований на модифікованій теоретико-множинній моделі обчислювального процесу з підтримкою функціональної стійкості, модифікованій моделі оцінювання часу виконання та енергоспоживання.

Під час виконання роботи було змодельовано ситуації щодо розподілу вхідних пулів завдань на обчислювальні ресурси в імітаційному середовищі моделювання, проведено симуляцію обчислювального процесу та самовідновлення в разі відмов ресурсів. Досягнуті результати свідчать про те, що впровадження методу не збільшує час виконання

завдання в умовах відсутності відмов. Навпаки, за наявності відмов запропонований метод дає змогу швидше відновити функціональність програмного завдання та зменшує тривалість виконання на 8–17 % з одночасним зменшенням енергоспоживання на 7–12 %. Також спостерігається зростання ефективності із збільшенням розмірності завдань та ймовірністю відмов.

Перспективним напрямом є розроблення технологій автоматизованого або автоматичного використання методів розподілу ресурсів та самовідновлення, особливо для хмарних систем різного призначення.

Список літератури

1. Kumar R., Singla S. A Study of Bug Manifestion Process for Ensuring Software Quality. *2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*. 8–19 June 2021. P.801–804. DOI: 10.1109/CSNT51715.2021.9509676
2. REPT: Reverse debugging of failures in deployed software / W. Cui et al. *In Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, OSDI 2018, Carlsbad, CA, October 2018*. P. 17–32. URL: <https://www.usenix.org/system/files/osdi18-cui.pdf>
3. Hoshino S., Arahori Y., Gondow K. Postmortem accurate IR-level state recovery for deployed concurrent programs. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*. Vol. 2021:3. P. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1145/3493499.3493502>
4. Thakkar A., Lohiya, R. A survey on intrusion detection system: feature selection, model, performance measures, application perspective, challenges, and future research directions. *Artif Intell.* 2022. Rev. 55. P.453–563. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10037-9>
5. Yihunie F., Abdelfattah E., Regmi A. Applying machine learning to anomaly-based intrusion detection systems. *In: 2019 IEEE Long Island systems, applications and technology conference (LISAT)*. IEEE, 2019. P.1–5. DOI: 10.1109/LISAT.2019.8817340
6. Wressnegger C., Kellner A. and Rieck K. ZOE: Content-Based Anomaly Detection for Industrial Control Systems. *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*. 2018. P. 27–138. DOI: 10.1109/DSN.2018.00025.978-1-5386-5596-2
7. Intrusion Detection and Identification Using Tree-Based Machine Learning Algorithms on DCS Network in the Oil Refinery / K. Ho Kim et al., *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022. Vol.37, No.6. P.4673–4682. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3150084
8. Song Y., Locasto M. E., Stavrou A. On the Infeasibility of Modeling Polymorphic Shell-code. *In Proceedings of the 14th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS 2007)*. 2007. P. 541–551. DOI: <https://doi.org/10.1145/1315245.1315312>
9. Qin F., Tucek J., Sundaresan, J., Zhou. Y. Rx: Treating Bugs as Allergies-A Safe Method to Survive Software Failures. *In Proceedings of the 20th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP 2005)*. 2005. P. 235–248. DOI: 10.1145/1275517.1275519
10. Chen C, Eisenhauer G. and Pande S. Near-Zero Downtime Recovery From Transient-Error-Induced Crashes. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2021. Vol. 33. Issue 5. P. 765–778. DOI: 10.1109/TPDS.2021.3096055
11. Bhat K., Kouwe E., Bos H. and Giuffrida C. FIREstarter: Practical Software Crash Recovery with Targeted Library-level Fault Injection. *2021 51st Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), Taipei, Taiwan*. 2021. P. 363–375. DOI: 10.1109/DSN48987.2021.00048.
12. Sweeper: A Lightweight End-To-End System for Defending Against Fast Worms / J. Tucek et al. *In Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Systems (Eu-roSys 2007)*. 2007. P. 115–128. DOI: 10.1145/1272996.1273010
13. Verma, S., Roy, S. Debug-localize-repair: a symbiotic construction for heap manipulations. *Form Methods Syst Des* 58. 2021. P. 399–439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10703-021-00387-z>
14. X. Zhao et al. Data backup policies with failure-oblivious computing in reliability theory. *Annals of Operations Research*. 2022. P. 1–12. DOI: 10.1007/s10479-022-04941-8
15. Farzadnia E., Shirazi H, Nowroozi A. A novel sophisticated hybrid method for intrusion detection using the artificial immune system. *Journal of Information Security and Applications*, 2022. Vol. 70. DOI: 10.1016/j.jisa.2020.102721
16. Рубан І., Волк М., Пісухін М. Метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2019. № 3 (64). С. 17–23. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.031723

17. М. Волк та ін. Журналізація стану програм для самовідновлення паралельних програмних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Випуск 2(72). С.76-82. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.2.080
18. Гора М., Волк М. Моделі управління ресурсами для забезпечення функціональної стійкості процесу розподілених обчислень. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. No 4(87). С. 244–251. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.28>
19. Saremi S., Mirjalili S., and Lewis A. Grasshopper Optimization Algorithm. *Theory and application. Elsevier, Advances in Engineering Software Journal*. 2017. No. 105. P. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004>
20. K. Kulkarni et al. An Inertia Weight Concept-Based salp Swarm Optimization Algorithm. *In Proceedings of the 2021 IEEE Madras Section Conference (MASCON), Chennai, India. 27–28 August 2021*. P. 1–6. DOI: 10.1109/MASCON51689.2021.9563412
21. WorkflowSim. URL: <https://github.com/WorkflowSim/WorkflowSim-1.0> (дата звернення 06.02.2024)

References

1. Kumar, R., Singla, S. (2021), "A Study of Bug Manifestation Process for Ensuring Software Quality" *2021 10th IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*. P. 801–804. DOI: 10.1109/CSNT51715.2021.9509676
2. Cui, W., Ge, X., Kasikci, B., Niu, B., Sharma, U., Wang, R., Yun, I. (2018), "REPT: Reverse debugging of failures in deployed software". *In Proceedings of the 13th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation, OSDI, Carlsbad, CA*. P. 17–32. available at: <https://www.usenix.org/system/files/osdi18-cui.pdf>
3. Hoshino, S., Arahori, Y., Gondow, K. (2021), "Postmortem accurate IR-level state recovery for deployed concurrent programs". *ACM SIGAPP Applied Computing Review*. Vol. 3. P. 33–48. DOI: <https://doi.org/10.1145/3493499.3493502>
4. Thakkar, A., Lohiya, R. (2022), "A survey on intrusion detection system: feature selection, model, performance measures, application perspective, challenges, and future research directions". *Artif Intell. Rev.* 55. P. 453–563. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10037-9>
5. Yihunie, F., Abdelfattah, E., Regmi, A. (2019), "Applying machine learning to anomaly-based intrusion detection systems". *In: 2019 IEEE Long Island systems, applications and technology conference (LISAT)*. IEEE. P. 1–5. DOI: 10.1109/LISAT.2019.8817340
6. Wressnegger, C., Kellner, A. and Rieck, K. (2028), "ZOE: Content-Based Anomaly Detection for Industrial Control Systems." *2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*. P. 27–138. DOI: 10.1109/DSN.2018.00025.978-1-5386-5596-2
7. Kim, R., Kwak, B., Han, M., Kim, H. (2022), "Intrusion Detection and Identification Using Tree-Based Machine Learning Algorithms on DCS Network in the Oil Refinery". *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.37, No.6. P. 4673–4682. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3150084
8. Song, Y., Locasto, M., Stavrou, A. (2007), "On the Infeasibility of Modeling Polymorphic Shell-code". *In Proceedings of the 14th ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS 2007)*. P. 541–551. DOI: <https://doi.org/10.1145/1315245.1315312>
9. Qin, F., Tucek, J., Sundaresan, J., Zhou, Y. (2005), "Rx: Treating Bugs As Allergies – A Safe Method To Survive Software Failures". *In Proceedings of the 20th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP 2005)*. P. 235–248. DOI: 10.1145/1275517.1275519
10. Chen, C., Eisenhauer, G., Pande, S. (2021), "Near-Zero Downtime Recovery From Transient-Error-Induced Crashes". *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. Vol. 33. Issue 5. P. 765–778. DOI: 10.1109/TPDS.2021.3096055
11. Bhat, K., Kouwe, E., Bos, H., Giuffrida, C. (2021), "FIRestarter: Practical Software Crash Recovery with Targeted Library-level Fault Injection". *2021 51st Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), Taipei, Taiwan*. P. 363–375. DOI: 10.1109/DSN48987.2021.00048.
12. Tucek, J., Newsome, J., Lu, S., Huang, C., Xanthos, S., Brumley, D., Zhou, Y., Song, D. (2007), "Sweeper: A Lightweight End-To-End System for Defending Against Fast Worms". *In Proceedings of the 2nd European Conference on Computer Systems (Eu-roSys 2007)*. P. 115–128. DOI: 10.1145/1272996.1273010
13. Verma, S., Roy, S. (2021), "Debug-localize-repair: a symbiotic construction for heap manipulations". *Form Methods syst Des* 58. 2021. P. 399–439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10703-021-00387-z>
14. Zhao, X., Wang, D., Mizutani, S., Nakagawa, T. (2022), "Data backup policies with failure-oblivious computing in reliability theory". *Annals of Operations Research*. P. 1–12. DOI: 10.1007/s10479-022-04941-8
15. Farzadnia, E., Shirazi, H., Nowroozi A. (2019), "A novel sophisticated hybrid method for intrusion detection using the artificial immune system". *Journal of Information Security and Applications*, 2022. Vol. 70. DOI: 10.1016/j.jisa.2020.102721
16. Ruban, I., Volk, M., Risukhin, M. (2019), "A method of self-healing of distributed software in heterogeneous computer systems" ["Metod samovidnovlennya rozpodilenooho prohrannoho zabezpechennya v heterohennykh komp'yuternykh systemakh"]. *Telecommunications and information technologies*. № 3(64). P. 17–23. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.0311723

17. Volk, M., Hora, M., Labazov, V., Mishenko, A., Barsukiv, A., Goletz, B. (2023), "Journaling of program status for self-healing of parallel software systems" ["Zhurnalizatsiya stanu prohram dlya samovidnovlennya paralel'nykh prohramnykh system"]. *Control, navigation and communication systems*. No 2(72). P. 76–82. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.2.080
18. Hora, M., Volk, M. (2023), "Resource management models to ensure the functional stability of the distributed computing process" ["Modeli upravlinnya resursamy dlya zabezpechennya funktsional'noyi stiykosti protsesu rozpodilenykh obchyslen"]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*. No 4(87). P. 244–251. DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.28>
19. Saremi, S., Mirjalili, S., Lewis, A. (2017), "Grasshopper Optimization Algorithm". *Theory and application. Elsevier, Advances in Engineering Software Journal*. No. 105. P. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.01.004>
20. Kulkarni, K. et al. (2021), "An Inertia Weight Concept-Based salp Swarm Optimization Algorithm". In *Proceedings of the 2021 IEEE Madras Section Conference (MASCON), Chennai, India*. 27–28 August 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/MASCON51689.2021.9563412
21. WorkflowSim. available at: <https://github.com/WorkflowSim/WorkflowSim-1.0> (last accessed 06.02.2024)

Надійшла 08.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Волк Максим Олександрович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: maksym.volk@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4229-9904>

Гора Максим Володимирович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: risuhin.max@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0085-3559>

Volk Maksym – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkov National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Electronic Computer, Kharkiv, Ukraine.

Hora Maksym – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

A MODIFIED METHOD OF SELF-RECOVERY OF DISTRIBUTED SOFTWARE IN HETEROGENEOUS COMPUTER SYSTEMS

The **object** of research is the distributed computing process in heterogeneous computer systems. The **subject** of the research is methods of self-healing for distributed software on heterogeneous computer systems. The **goal** is to increase the efficiency of distributed data processing systems with support for the functional stability of the computing process by developing a modified method of self-healing of distributed software. **Tasks:** to investigate the existing methods of restoring the distributed computing process, to draw conclusions about their advantages and disadvantages; on the basis of mathematical models of tasks, computing resources and existing methods of resource allocation, develop a modification of the method of self-recovery of distributed software taking into account management strategies, finding the best solution for the selected criteria, reducing energy consumption during the execution of tasks; conduct a number of experiments comparing the developed method with existing ones. Research **methods** are based on the use of set theory, general systems theory, and simulation modeling theory. The **results** of the experiments obtained during the simulation of the allocation of software tasks to computing resources in a simulated simulation environment and the simulation of the computing process during self-recovery in case of resource failures confirm the effectiveness of the proposed method. **Conclusion:** the application of the method in distributed computing control systems does not increase the time the system spends on performing the task in the absence of failures, at the same time, in the presence of failures, it allows to restore the functionality of the software task faster and reduces the execution time by 8–17%, and energy consumption by 7–12%. There is also an increase in efficiency with an increase in the size of the tasks and the probability of failures. The development of technologies for automated or automatic use of methods of resource allocation and self-recovery can be indicated as areas for future research.

Keywords: self-healing methods; software; distributed computing; computer systems; cloud architectures; software agents.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Волк М. О., Гора М. В. Модифікований метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.005>

Volk, M., Hora, M. (2024), "A modified method of self-recovery of distributed software in heterogeneous computer systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No.1 (27), P.5–17. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.005>

O. GAVRILENKO, M. MYAGKYI

ANALYSIS OF COMMUNITIES AND GROUPS IN SOCIAL NETWORKS AS A SIGNIFICANT FACTOR OF INFLUENCE ON CRYPTOCURRENCY RATES

Currently, most existing cryptocurrency exchanges do not have tools in their arsenal that would allow them to verify and investigate information disseminated on social media regarding a particular cryptocurrency. This allows to conduct research with the subsequent development of an appropriate tool that, if used correctly, will provide users with recommendations on how to proceed with the cryptocurrency under investigation. Based on this advice, interested parties will be able to adjust their decisions regarding further financial steps. As part of this task, it is important to choose a social network that would best meet the requirements, as this is what determines the impact of celebrity publications on the formation of prices for a particular cryptocurrency at a certain point in time. The importance and existence of this influence has been previously proven by statistical methods. The **purpose of the study** is to identify and analyse the key aspects when choosing social networks for further monitoring of social groups in order to analyse the impact of posts on the course of the chosen cryptocurrency. The object of the **study** is social networks. A set of selection criteria, coefficients of their importance, and statistical data on the selected social networks were used as input data, on the basis of which the values of the alternatives (social networks) will be obtained. The objective of the **study** is to evaluate and rank social networks in order to choose the one that will best meet the specifics of analysing the impact of social media posts on the cryptocurrency rate. **Research methods.** The ranking of social networks was carried out by the value of the value function of alternatives, calculated using the linear convolution method. **Results.** As a result of the research, an algorithm has been developed that allows analysing the selected social networks for their compliance with the formulated criteria. The results of the experiment with the selected social networks were presented. As a result, a ranked list of them is obtained. Based on the results obtained, the authors will develop an information technology for determining the impact of posts of famous people in social networks on cryptocurrency rates.

Keywords: cryptocurrency rate; social media; decision maker; importance coefficients; scaling; evaluation of alternatives; criterion value function; social media ranking; information technology.

1. Introduction

The cryptocurrency exchange rate is the result of the interaction of various factors, which may include technical, economic, political and other aspects.

In particular, some of the main factors that can influence the cryptocurrency rate are:

Popularity and usage: The growing popularity and support of a cryptocurrency among users, investors, and businesses can lead to an increase in its price.

Regulation and legislation: Changes in the regulation of the cryptocurrency market, including bans or regulations from governments, can affect the credibility of a cryptocurrency and its price.

Technical updates and events: Technical updates, developments, and other events in the development of blockchain technologies and cryptocurrencies may affect their price.

Events in the traditional finance market: Economic crises, changes in exchange rates, gold prices, and other factors in the traditional finance market can affect the price of cryptocurrencies.

Media reports and public opinion: News, articles, and messages in the media and social media about cryptocurrencies can affect public perception and, consequently, the price.

Large transactions and volatility: Large transactions and significant price changes can cause a lot of volatility in the cryptocurrency price.

Technical analysis and trading: Technical analysis, as well as trading and speculation in the cryptocurrency market, can influence the course through traders' trading actions and strategies.

Due to these various factors, the cryptocurrency rate can experience significant fluctuations in the short and long term.

The process of choosing the "right" social media for the study of social groups is essential in the context of the topic of researching the impact of expert publications on cryptocurrency rates. Currently, social networks are one of the most powerful tools for analyzing social groups, as they provide access to a current, large amount of data, such as information about communication, interests, and behavior of users. Choosing the "right" social media platforms is a key step in conducting social

group research because of their significant impact on the research results. Choosing the "wrong" platform can lead to incomplete or even distorted data, which will negatively affect the objectivity and reliability of the results. It is also important to take into account the peculiarities of each social network selected for the study, such as the composition of the audience, types of communication, mechanisms of information dissemination, and others. Such an analysis allows you to choose the platforms that best meet the research objectives and ensure maximum efficiency of social group analysis.

The aim of this study is to identify and analyze the key aspects when choosing social networks for further monitoring of social groups as part of the analysis of such a significant factor of influence on the course of the chosen cryptocurrency as posts in them.

In particular, these aspects include:

- Availability and volume of data in social networks,
- Representativeness of the audience and its characteristics,
- Methods and tools for analyzing social media,
- Criteria for evaluating the effectiveness and practicality of platforms,
- Contextual factors that influence the choice of social media,
- Practical recommendations for choosing and using social media in the study of social groups.

According to the goal, the objectives of the study are to evaluate and rank social networks in order to choose the one that best suits the specifics of analyzing the impact of social media posts on the cryptocurrency rate.

2. Literature review

Nowadays, the analysis of publications on the Internet is very important, as it allows to obtain a large amount of information about the moods and intentions of users.

Paper [1] discusses the process of computer detection and categorization of opinions expressed in a piece of text to determine whether the author's attitude toward a particular topic, product, etc. is positive, negative, or neutral. A detailed study of the analysis of temporal sentiment and the cause-and-effect relationship of sentiment. Using this analysis, we can find out the generalized event based on the mood and time. On the other hand, the use of causality will be useful not only for determining the causes and effects,

respectively, but also for their further forecasting. The main part of the publication is a review of the combination of these two approaches, which degenerates into a model that allows you to determine the mood for future events, as well as create a time forecast for the time that will pass between certain events. The following parameters were used to assess accuracy: mean absolute error and root mean square error.

To view publications, you need to choose a place where there are the most of them and they are in a single text format, for this purpose Twitter is a good messenger, work [2] describes in detail the special linguistic analysis and statistics of Twitter. This study aimed to identify criminal elements in the United States by modeling topics of discussion and then incorporating them into a crime prediction model. Thus, a study was conducted on the impact of social media posts on future crimes.

In [3], methods for predicting user ratings of individual items using probabilistic algorithms were considered. In fact, the article perfectly illustrates the existence of computational patterns regarding what network users will like under certain circumstances. In other words, this study emphasizes the impact of probabilistic algorithms in the field of recommender systems, and provides an overview of key methods that have been successfully applied. The considered algorithms for object classification allow solving the problem of predicting user evaluation of content and its categorization, as well as improving existing methodologies for building information systems.

Work [4] considered a comprehensive reference for researchers and practitioners, as well as covering all areas that contribute to the construction and analysis of social networks.

Paper [5] is quite relevant today due to the difficult epidemiological situation in the world. It analyzed microblogs on Twitter and proposed several methods for reliable classification of tweets based on their sentiment and data visualization using an interactive map in real time.

The paper [6] identified individuals who influence knowledge sharing processes through an internal social network and predicted future knowledge flows that may cross it. The authors use exploratory research and develop a four-phase methodology that combines social network analysis with structural modeling.

The article [7] discusses the expanded use of social media in society and its significant impact on organizations' financial performance and market share. It describes how social media communities influence broader financial trends.

Paper [8] presents a study of user adoption of a hypothetical social network-backed cryptocurrency in Central Europe, which provides insight into how social media communities can influence cryptocurrency markets.

Paper [9] describes the role of brand connectivity in engaging consumers in social media brand communities. It presents the results of a study on how strong community ties can influence consumer behavior, which can potentially be applied to cryptocurrency communities.

Paper [10] presents the results of a study of the role of social community members in the formation and increase of digital assets existing in the blockchain.

All of these works demonstrate the important role of posts on social networks as a means of shaping the opinions of social community members regarding a particular problem, in particular the situation in the cryptocurrency market.

In works [11–13], the authors of this paper analyzed the level of influence of posts by famous personalities in social networks on the course of the chosen cryptocurrency using statistical and probabilistic methods. As the results of the study show, the ATAPSN algorithm and its modifications proposed in these articles allow for a more accurate forecast of the cryptocurrency rate than classical time-series algorithms, which do not allow for the assessment of the influence of this factor. According to the above studies, it can be stated that the posts of famous personalities for a short period of time to some extent affect the rate of the chosen cryptocurrency due to the fact that they can shape the opinion of their numerous subscribers on issues that directly or indirectly relate to this cryptocurrency. The level of their influence depends on the criteria for selecting these individuals, which are presented in the paper [14].

The analyzed articles do not provide a methodology for analyzing social networks in order to choose one that would best suit the specifics of studying the impact of posts on it on the rate of the chosen cryptocurrency. This task, according to the authors, has not been sufficiently studied. That is why this paper is devoted to it.

3. Social media selection criteria

To solve the problem of choosing the most suitable social network, the following criteria were formulated:

Criterion 1: Data availability and volume

1) The volume of users and platform activity: One of the key criteria is the number of active users and their activity on the social network. The more users and

the more actively they interact on the platform, the more data is available for analysis.

2) Variety of content and formats: It's important to keep in mind that different social networks have different types of content (texts, photos, videos, audio, etc.). Evaluating the variety of content will help determine how much and what types of data can be extracted from a particular platform.

3) Data retrieval capabilities: Before selecting a social network for analysis, it is important to determine whether there are opportunities to extract data from it. Some platforms provide APIs for data retrieval, while others may prohibit the collection of information directly from the platform.

4) Access to historical data: For a deeper analysis of social groups, it may be important to have access to historical data to study the dynamics of changes over time.

5) Availability of additional analysis tools: In addition to the platform itself, it is also important to assess the availability and level of development of data analysis tools on a particular platform. The availability of tools for collecting, processing, and visualizing data will greatly simplify the research process.

Criterion 2: Audience and its representativeness

1) Demographic characteristics of users: It is important to consider the demographic characteristics of the social media audience, such as age, gender, geographic location, social status, etc. This data will help to draw conclusions about the representativeness of the audience and its relevance to the chosen research topic.

2) User interests and behavior: Analyzing user interests and behavior will help you understand whether the platform's audience meets the research objectives. For example, if the research is aimed at analyzing political opinions, it is important to choose a platform where users actively discuss political issues.

3) Audience activity and interaction: To ensure the representativeness of the study, it is important that the platform's audience is active and interacts with each other. A high level of activity indicates user engagement and the possibility of obtaining more data for analysis.

4) Behavior towards publications and interaction with content: Analyzing audience reactions to posts and their interaction with content (likes, comments, reposts, etc.) will help you understand how actively the audience perceives and interacts with information. This is important for assessing the impact of the platform on social groups and their activity.

Criterion 3: Data analysis and processing capabilities

1) Availability of APIs and tools for data retrieval: It's important to check whether the platform provides access to its API for data retrieval. An API allows you to automate the data collection process and gain access to a variety of information about users and their interactions.

2) Data filtering and sorting capabilities: Some social media platforms provide advanced features for filtering and sorting data by various parameters such as date, location, content type, etc. This allows for more precise and specific analysis.

3) Data visualization capabilities: It is important that the platform provides the ability to visualize the data in a convenient and understandable way. Graphs, charts, and other visual elements will help make the analysis more informative and understandable.

4) Support for programming languages and analytical tools: Some social networks provide support for different programming languages and analytical tools, which simplifies the process of data processing and analysis.

5) Opportunities for machine learning and text analysis: It is important to consider the availability of tools for applying machine learning and text analysis methods to the data. This will allow you to draw deeper and more comprehensive conclusions from the collected data.

Criterion 4: Specification of the platform and its tools

1) Availability of data analysis functions: You need to check what specific data analysis features the platform provides. This may include audience statistics, tools

• each of the l factors that describe a particular criterion is assigned a numerical indicator $x_{ij}^k, k = \overline{1, l}$ – the value of the alternative a_i assessment according to the k -th factor of the j -th criterion.

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{low level of compliance with the criterion } j, \\ 0,5, & \text{sufficient level of compliance with the criterion } j, \\ 1, & \text{high level of compliance with the criterion } j; \end{cases} \quad (1)$$

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 0, & \text{low level of compliance with the factor } k, \\ 0,5, & \text{sufficient level of compliance with the factor } k, \\ 1, & \text{high level of compliance with the factor } k; \end{cases} \quad (2)$$

• a set of l numbers $(\omega_j^1, \dots, \omega_j^l)$, that meet the criteria for evaluating the k -th factor of the j -th criterion and determine the preferences of the decision maker for each criterion (hereinafter referred

for analyzing audience interaction, filtering and sorting data, etc.

2) Monitoring and trend analysis capabilities: It is important that the platform provides the ability to monitor and analyze trends in communication and posts on the platform. This allows you to identify and respond to trending topics.

3) Level of data security and privacy: Equally important is the specification of the level of data security and privacy on the platform. You need to make sure that the platform complies with the relevant security and personal data protection standards.

4. Method for selecting and evaluating social networks**4.1. Statement of the task**

Let there be given:

• a set of acceptable alternatives $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ (of the considered social networks), which are evaluated according to m criteria (see Section 3);

• each alternative $a_i, i = \overline{1, n}$ m numerical indicators are set in line with each other x_{i1}, \dots, x_{im} , where $x_{ij}, j = \overline{1, m}$ – value of the alternative evaluation a_i according to j -th criterion.

It should be noted that in order to determine the indicator x_{ij} , it is necessary to choose an appropriate rating scale. It is usually chosen at the discretion of the decision maker. In particular, the following rating scale was used in this paper:

It should be noted that to determine the indicator x_{ij}^k it is also necessary to choose an appropriate evaluation scale:

to as the weighting factor of importance of the factor ω_j^k);

• a set of m numbers $(\omega_1, \dots, \omega_m)$, that meet the criteria for evaluating alternatives and determine the

preferences of the decision maker for each criterion (hereinafter referred to as the weighting factor of the importance of the criteria ω_j).

Then the decision maker's task is to choose an alternative $a_i A$ so as to maximize the value function v_i represented by the following expression:

$$v_i = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k=1}^l x_{ik}^k \omega_{ij}^k \right) \omega_j, \quad (3)$$

or

$$v_i = \sum_{j=1}^m x_{ij} \omega_j, \quad (4)$$

where

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^l x_{ik}^k \omega_{ij}^k, \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^l \omega_{ij}^k = 1, \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^m \omega_j = 1. \quad (7)$$

where $\omega_{ij}^k \in [0;1]$, $\omega_j \in [0;1]$.

Based on the obtained values of the value functions v_i , it is necessary to rank the alternatives in order to determine the social network that best meets the needs of the study – assessing the impact of posts by famous people in a social network on the rate of the chosen cryptocurrency.

4.2. Justification

To calculate the indicators x_{ij}^k or x_{ij} . It is important to choose a scale on which to evaluate the factors or criteria. For example, you can choose a 5, 10, 12, or 100-point scale. Fractions from the range $[0;1]$ or their percentage equivalents can also be used as scores. The chosen scaling should meet the needs of the decision maker and be consistent across all indicators.

It should also be noted that the weighting of the importance of factors and criteria ω_{ij}^k , ω_j (see formulas (3)–(5)) can be chosen at the discretion of the decision maker. They can also be determined by:

1) statistical methods, in particular by calculating paired Pearson correlation coefficients,

2) in the process of calculating the coefficients of a multivariate regression model.

In addition, they can be identified by means of data mining. In particular:

PageRank: One of the most famous algorithms for determining influential users on social media. PageRank

determines a user's influence based on the number and quality of connections they have with other users. For example, on Twitter, PageRank can identify users with a large number of followers and their activity on the network.

HITS (Hyperlink-Induced Topic Search): This algorithm determines the influence of users based on two parameters: hubs and influencers. Hubs are users who have a lot of outbound connections, i.e. many links to their pages. Influencers are users who have a lot of inbound links, i.e. many links to their pages. This algorithm can be useful for identifying experts in a particular topic.

Centrality Measures: These metrics measure the degree of centrality of users in the network. For example, Betweenness Centrality measures the number of shortest paths between all pairs of users that pass through a given user. The more such paths, the greater the centrality of the user.

Sentiment Analysis: This tool is used to determine the mood or emotional state of users in relation to a particular content or topic. For example, it can identify users who have a negative or positive attitude toward a particular product or service.

In this study, the linear convolution method was used as a method for evaluating social networks [15–16]. The value functions for each alternative were calculated according to formula (3) or (4), where the scaling given in formulae (1) and (2), respectively, was used to calculate the indicators x_{ij} or x_{ij}^k . This scaling was chosen for reasons of simplification of calculations and it allows to achieve the desired results, which was established by the authors of the paper experimentally. The weighting coefficients of the importance of the factors and criteria ω_{ij}^k were established by the authors of the paper in accordance with the needs of the study.

According to the description of the criteria presented in Section 3 and the task statement (see Section 4.1), the following tables were formed for each alternative (social network) a_i :

Table 1. Criterion 1: Data availability and volume

k	Criterion 1 Factor	x_{i1}^k	ω_{i1}^k
1	Volume of users and platform activity	x_{i1}^1	ω_{i1}^1
2	Variety of content and formats	x_{i1}^2	ω_{i1}^2
3	Opportunities to obtain data	x_{i1}^3	ω_{i1}^3
4	Access to historical data	x_{i1}^4	ω_{i1}^4
5	Availability of additional tools for analysis	x_{i1}^5	ω_{i1}^5

Table 2. Criterion 2: Audience and its representativeness

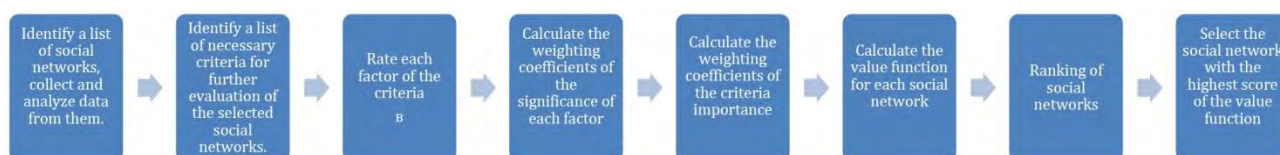
k	Criterion 2 Factor	x_{i2}^k	ω_{i2}^k
1	Demographic characteristics of users	x_{i2}^1	ω_{i2}^1
2	Interests and behavior of users	x_{i2}^2	ω_{i2}^2
3	Audience activity and interaction	x_{i2}^3	ω_{i2}^3
4	Behavior towards publications and interaction with content	x_{i2}^4	ω_{i2}^4

Table 3. Criterion 3: Data analysis and processing capabilities

k	Criterion 3 Factor	x_{i3}^k	ω_{i3}^k
1	Availability of APIs and tools for data retrieval	x_{i3}^1	ω_{i3}^1
2	Possibilities of data filtering and sorting	x_{i3}^2	ω_{i3}^2
3	Data visualization capabilities	x_{i3}^3	ω_{i3}^3
4	Support for programming languages and analytical tools	x_{i3}^4	ω_{i3}^4
5	Opportunities for machine learning and text analysis	x_{i3}^5	ω_{i3}^5

Table 4. Criterion 4: Specification of the platform and its tools

k	Criterion 4 Factor	x_{i4}^k	ω_{i4}^k
1	Availability of data analysis functions	x_{i4}^1	ω_{i4}^1
2	Opportunities for monitoring and trend analysis	x_{i4}^2	ω_{i4}^2
3	Level of data security and confidentiality	x_{i4}^3	ω_{i4}^3

**Fig. 1.** Diagram of the proposed algorithm

4.3. The results obtained

As a result of the experiment, 5 major social networks were considered: Facebook, Telegram, Instagram, X, Tik Tok. Each of them was analyzed according to the following algorithm. As a result, the following ranked list was generated:

Table 5. Evaluation of the value function for selected social networks

i	Name of the network	v_i
1	Telegram	0,975
2	X	0,61
3	Facebook	0,58
4	Instagram	0,545
5	Tik Tok	0,445

On the basis of Tables 1–4 and formulas (2), (3), (6), we determine the alternative with the highest value of the value function.

Thus, in the framework of the study, the following algorithm for evaluating social networks was proposed:

Step 1: Determine the list of social networks, collect and analyze data from them.

Step 2: Determine the list of necessary criteria for further evaluation of the selected social networks.

Step 3: Based on the collected statistical data, assign scores x_{ij}^k to each factor of the criteria under consideration according to the defined evaluation scale (see formula (2)).

Step 4: Calculate the importance weights of each factor ω_{ij}^k (see formula (6)) based on the preliminary analysis of the statistical data.

Step 5: Calculate the importance weights of the criteria ω_j (see formula (7)).

Step 6: Calculate the value function v_i for each social network (see formula (3)).

Step 7: Rank the social networks according to the obtained values of the corresponding value function.

Step 8: Select the social network with the highest value of the value function as the most suitable for research.

Fig. 1 shows a diagram of the proposed algorithm.

Therefore, in the future, the authors will use the Telegram network to study the impact of celebrity posts on social networks, as it has the highest value function within the framework of the criteria under consideration.

5. Conclusions

In this paper, we propose one of the possible methods of analyzing social networks for compliance with all the requirements for studying the impact of posts on them on the rates of the chosen cryptocurrency. The algorithms for assessing this influence and the criteria for selecting famous personalities are presented in the authors' previous works [11–14].

In this paper, the linear convolution method was used as a method for evaluating social networks, as it is the simplest and most intuitive of all possible approaches. In addition to the proposed method, it is also possible to use such methods as the hierarchy analysis method (HAM) and the TOPSIS method.

One of the most important tasks within the proposed method is the selection of evaluation criteria. Depending on their choice, the results of the analysis of the same social networks can be completely different. When forming the list of criteria, the role of the decision maker is crucial.

The role of the decision maker is important for obtaining the weighting coefficients of the importance of factors and criteria ω_{ij}^k , ω_j . They can also be determined by statistical methods, in particular, using Pearson correlation coefficients, or in the process of calculating the coefficients of a multivariate regression model. In addition, they can be determined by means of data mining. It should be noted that, depending

on the priorities of the decision maker or the quality of the input statistical data, different values for these coefficients are possible.

To calculate the indicators x_{ij}^k or x_{ij} , it is important to choose a scale on which to evaluate the factors or criteria. In particular, a 5, 10, 12, or 100-point scale can be selected. Fractions from the interval $[0:1]$ or their equivalents in percentage terms can also be selected as scores. The chosen scaling should meet the needs of the decision maker and be consistent across all indicators.

The correctness of the obtained results was verified experimentally.

The proposed algorithm is universal and can be used to analyze social networks for compliance with the criteria of any study based on statistical data obtained from them.

In the future, the results of this study will be used to create an information technology for determining the impact of social media posts on cryptocurrency rates.

References

1. Preethi, P.G., Uma, V., Kumar, A. (2015), "Temporal Sentiment Analysis and Causal Rules Extraction from Tweets for Event Prediction". *Procedia Computer Science*. №48. P. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.04.154>
2. Gerber, M. (2014), "Predicting crime using Twitter and kernel density estimation". *Decision Support Systems*. № 61. P. 115–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2014.02.003>
3. Gavrilenko, O.V., Kuptsova, I.V. (2018), "Research of tasks of estimation of objects in computer social networks by means of reliable algorithms". Materials of the 8th international scientific and technical conference *Modern directions of development of information and communication technologies and means of management*, Kharkiv, April 26–27, 2018. P. 67–68. available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/17fb7e70-7255-4f3c-a1f3-f0198aea5972/content>. (last accessed: 14.03.2024).
4. Alhadj, R., Rokne, J. (2020), "Encyclopedia of Social Network Analysis and Mining". *Analysis and Mining*. Springer, New York, NY. 2699 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7163-9>
5. Byrd, K., Mansurov, A., Baysal, O. (2016), "Mining Twitter data for influenza detection and surveillance". *SEHS '16: Proceedings of the International Workshop on Software Engineering in Healthcare Systems*. P. 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1145/2897683.2897693>
6. Ramona-Diana, Leon, Raúl, Rodríguez-Rodríguez, Pedro, Gómez-Gasquet, Josefa, Mula (2017), "Social network analysis: A tool for evaluating and predicting future knowledge flows from an insurance organization". *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 114. P. 103–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.07.032>
7. Ardekani, M. J., Owlia, M. S., Shishebori, D., Mehrjardi, Y. Z. (2024), "Unravelling the Dynamics: Social Media, Absorptive Capacity, and Organizational Performance". *International Journal of Emgineering*. Vol. 37, № 2. P. 387–401. available at: <https://www.ije.ir/?action=article&au=817130&au=Owlia,%20M.%20S>. (last accessed: 14.03.2024).
8. M. Reckó, M. Aranyosy (2024), "User acceptance of social network-backed cryptocurrency: a unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT)-based analysis". *Financial Innovation*. Vol. 10, № 57. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40854-023-00511-4>
9. Luo, G., Hao, J., Ma, H. (2024), "The impact of brand connectedness on consumer engagement behavior in the social media brand community". *Journal of Research in Interactive Marketing*. ISSN: 2040-7122. available at: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JRIM-05-2023-0146/full/html> (last accessed: 14.03.2024).
10. Christopher, Westland, Periodicity, J. (2024), "Elliott waves, and fractals in the NFT market". *Scientific Reports*. Vol. 14, 4480 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55011-x>
11. Gavrylenko, O., Miahkyi, M., Zhurakovskiy, Y. (2022), "The task of analyzing publications to build a forecast for changes in cryptocurrency rates". *Adaptive automatic control systems*. Vol. 2 № 41. P. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.41.2022.271349>
12. Bidyuk, P., Gavrilenko, O., Myagkyi, M. (2023), "The algorithm for predicting the cryptocurrency rate taking into account the influence of posts of a group of famous people in social networks". *System research and information technology: an international scientific and technical journal*. № 2. P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.2.02>
13. Gavrilenko, O., Myagkyi, M. (2023), "Forecasting the cryptocurrency exchange rate based on the ranking of expert opinions". *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 4 (26). P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.26.024>

14. Gavrilenko, O., Myagkyi, M. "Investigation of the impact of expert group posts on the cryptocurrency rate". *XIX International Scientific Conference named after Academician Mykhailo Kravchuk, dedicated to the 125th anniversary of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*. Abstracts of reports. P. 156–158. available at: <https://matan.kpi.ua/media/2023/kravchuk-conf-2023/kravchuk2023-abstracts.pdf>. (last accessed: 14.03.2024).
15. Michkivsky, S.M., Prigunov, O.V., Rymar, P.V. (2019), "Decision-making systems and methods: methodological guidelines". Vinnytsia, Vasyl' Stus DonNU. 76 p. available at: <https://r.donnu.edu.ua/bitstream/123456789/> (last accessed: 14.03.2024).
16. Bidyuk, P.I., Tymoshchuk, O.L., Kovalenko, A.E., Korshevnyuk, L.O. "Systems and methods of decision support. Textbook". Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 2022. 610 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6958f683-fbac-4506-9c85-5115c8f8b4c6/content>. (last accessed: 14.03.2024).

Received 10.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Гавриленко Олена Валеріївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки, Київ, Україна; e-mail: gelena1980@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0413-6274>

Мягкий Михайло Юрійович – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки, Київ, Україна; e-mail: mishamyagkiy3@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8038-8839>

Gavrilenko Olena – PhD (Physics and Mathematics Sciences), Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Informatics and Computer Science, Kyiv, Ukraine.

Myagkyi Mykhailo – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Informatics and Computer Science, Kyiv, Ukraine.

АНАЛІЗ СПІЛЬНОТ І ГРУП У СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ЯК ЗНАЧУЩОГО ФАКТОРА ВПЛИВУ НА КУРСИ КРИПТОВАЛЮТ

Нині більшість криптовалютних бірж не мають у своєму арсеналі інструментів, що дали б змогу перевірити та дослідити інформацію, яка поширюється в соціальних мережах про ту чи іншу криптовалюту. Це дозволяє проводити дослідження з подальшим розробленням відповідного інструменту, який за умови коректного використання надаватиме користувачам рекомендації щодо подальших дій у системі криптовалюти. Грунтуючись на цих порадах, зацікавлені особи зможуть коригувати свої рішення щодо фінансових кроків. У межах цього завдання важливим є вибір соціальної мережі, яка б максимально відповідала поставленим вимогам, оскільки саме від цього залежить вплив публікацій відомих осіб на формування цін за певну криптовалюту в конкретний момент часу. Важливість і наявність цього впливу було доведено раніше статистичними методами. **Метою дослідження** є ідентифікація та аналіз ключових аспектів у виборі соціальних мереж для подальшого моніторингу соціальних груп у межах аналізу впливу дописів у них на курс обраної криптовалюти. **Об'єктом вивчення** є соціальні мережі. Як вхідна інформація застосовувалися набір критеріїв відбору, коефіцієнти їх важливості, статистичні показники про обрані соціальні мережі, на основі яких будуть отримані значення оцінок альтернатив (соціальних мереж). **Завдання дослідження:** оцінювання та ранжування соціальних мереж з метою вибору такої, що максимально відповідатиме особливостям аналізу впливу дописів у соціальних мережах на курс криптовалюти. **Методи дослідження.** Ранжування соціальних мереж здійснювалося за значенням функції цінності альтернатив, що обчислювалися за допомогою методу лінійної згортки. **Досягнуті результати.** У процесі проведених досліджень розроблено алгоритм, який дає змогу проаналізувати обрані соціальні мережі щодо їх відповідності сформульованим критеріям. У статті подано результати експерименту з обраними соціальними мережами. Унаслідок отримано їх ранжований список. На основі досягнутих результатів автори роботи сформували інформаційну технологію визначення впливу дописів відомих людей у соціальних мережах на курси криптовалют.

Ключові слова: курс криптовалюти; соціальні мережі; особа, що приймає рішення; коефіцієнти важливості; шкалування; оцінки альтернатив; функція цінності критерію; ранжування соціальних мереж; інформаційна технологія.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гавриленко О. В., Мягкий М. Ю. Аналіз спільнот і груп у соціальних мережах як значущого фактора впливу на курси криптовалют. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.018>

Gavrilenko, O., Myagkyi, M. (2024), "Analysis of communities and groups in social networks as a significant factor of influence on cryptocurrency rates", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.018>

Д. ГОБОВ, Н. ШЕВЧЕНКО

ВИЗНАЧЕННЯ АРХІТЕКТУРИ ВИМОГ ДО ІТ-РІШЕННЯ ЯК БІЗНЕС-АНАЛІТИЧНОГО ПРОДУКТУ

Предметом дослідження в статті є підходи до розуміння та тлумачення поняття архітектури вимог до ІТ-рішення. **Мета роботи** – надати визначення архітектурі вимог до ІТ-рішення для кращого розуміння й подальшого впровадження цього концепту в практику розроблення програмного забезпечення. У статті передбачається виконання таких **завдань**: проаналізувати підходи до класифікації вимог з метою встановлення спільних та відмінних характеристик і їх впливу на визначення архітектури вимог; проаналізувати стандарти з інженерії вимог для пошуку визначення та будь-яких зав'язків з архітектурою вимог; розглянути підходи до побудови набору вимог та використання шаблонів для їх опису з метою виявлення оптимальних стратегій для бізнес-аналітичних процесів та їх впливу на архітектуру вимог. Використовуються такі **методи**: компаративний аналіз, зокрема порівняння та узагальнення різних класифікацій вимог з огляду на їх вплив на визначення архітектури вимог; аналіз та узагальнення підходів до інженерії вимог для виявлення їх впливу на процес формування архітектури вимог; системний аналіз понять «вимога» та «архітектура вимог»; метод порівняння та аналогій у вивченні питання використання шаблонів для опису вимог у контексті побудови архітектури вимог. Крім того, впроваджено метод аналогового моделювання для виявлення зав'язків між якістю вимог та їх архітектурою, який дав змогу визначити оптимальні підходи до побудови архітектури вимог, що відповідають вимогам якості програмного забезпечення. **Досягнуті результати**: досліджено підходи до розуміння вимог у процесі розроблення програмного забезпечення; наведено загальноприйняті класифікації вимог та характеристики якісних вимог; проаналізовано зв'язки ланцюжка "вимоги – якість вимог – підходи до опису вимог – стандарти – архітектура вимог" з подальшою логічною проекцією вивченого контексту на архітектуру вимог; запропоновано авторське визначення поняття "архітектура вимог". **Висновки**. Архітектура вимог може базуватися на різних архітектурних фреймворках, залежить від методологій розроблення програмного забезпечення, але водночас вона може варіюватися відповідно до галузевих стандартів і потреб конкретного проєкту, також архітектура вимог може використовувати певні шаблони документів, проте не обмежується ними.

Ключові слова: бізнес-аналіз; вимоги до програмного забезпечення; документування вимог; подання вимог; точка зору на структуру вимог; архітектура вимог.

Вступ. Визначення проблеми

Бізнес-аналіз – це діяльність, що забезпечує можливість змін підприємства внаслідок визначення потреб і рекомендацій рішень, які приносять користь зацікавленим сторонам. Бізнес-аналіз допомагає організації формулювати потреби та обґрунтовувати зміни, а також проєктувати та описувати корисні рішення. Крім того, бізнес-аналіз – це наукова дисципліна з чітко визначеними принципами, концепціями та практиками, що в сукупності допомагають фахівцям із бізнес-аналізу та організаціям створювати бажані результати [1]. Ланкою-посередником між формулюванням потреби та обґрунтуванням змін є набір завдань щодо роботи з вимогами: виявлення, аналіз, валідація та управління.

У сфері інформаційних технологій бізнес-аналіз є ключовою діяльністю, спрямованою на досягнення змін і вдосконалення підприємства через ідентифікацію потреб і надання рекомендацій, зокрема щодо

розроблення, модифікації, упровадження програмного забезпечення. Якісні продукти бізнес-аналізу (артефакти – будь-які об'єкти, що стосуються рішення та створюються в межах зусиль бізнес-аналізу) допомагають підприємствам обґрунтовувати зміни та впроваджувати ефективні рішення. Якісні вимоги є критерієм успішності продукту та визначають його спроможність приносити користь зацікавленим сторонам. Неякісні вимоги можуть призвести до серйозних наслідків, наприклад, позначитися на бюджеті, термінах виконання проєкту й на рівні задоволення стейкхолдерів.

Вивченню критеріїв якості вимог до програмного забезпечення присвячено чимало наукових праць і практичних дослідів, а вимоги до якості визначені багатьма спеціалізованими стандартами (наприклад, *ISO29148* та *IREB*) [2, 3]. Однак, як зазначається в роботі [4], навіть за умови масштабного вивчення підходів до визначення якості вимог, питання критеріїв якості залишається відкритим, особливо

з погляду фахівців, які безпосередньо працюють з вимогами. У статті [4] одним із напрямів покращення якості вимог визнано використання шаблонів і контрольних показників якості, проведення ретроспективи вимог.

Відповідно до ВАВОК [5] "вимога" – це придатне для використання подання потреби, і це "подання" починає своє існування як результат діяльності бізнес-аналітика вже на стадії виявлення або збору інформації. Вимоги зосереджені на розумінні того, яка цінність може бути отримана внаслідок її виконання. "Дизайн" – придатне для використання подання рішення, що визначає, як саме рішення зможе приносити користь зацікавленим сторонам. В ІТ-проектах цей термін використовується в контексті технологій та передбачає визначення того, як технології будуть використовуватись для виконання завдань бізнесу. Дизайн може містити дизайн користувацьких інтерфейсів, архітектурні моделі, моделі бізнес-процесів. Для чіткого розмежування документів, що створюють бізнес-аналітики та фахівці в галузі рішень (архітектори, розробники), замість терміна "дизайн" часто застосовують словосполучення "вимоги до рішення". За змістом, це подання може бути документом (або набором документів) і здатне значно змінюватися залежно від обставин.

Робота з аналізу вимог та визначення дизайну рішення передбачає:

- специфікацію та моделювання вимог для докладного опису набору вимог чи дизайну з використанням аналітичних методів;

- верифікацію вимог для перевірки того, що набір вимог або дизайну опрацьовано досить детально для використання конкретною зацікавленою стороною, внутрішньо несуперечливий і має високу якість;

- валідацію вимог для перевірки того, що набір вимог або дизайну корисний для бізнесу й підтримує цілі та завдання організації;

- визначення архітектури вимог для структурування всіх вимог і дизайну так, щоб вони підтримували кінцеву бізнес-мету зміни та успішно працювали як єдине ціле;

- визначення варіантів вирішення для виявлення, вивчення та опису різних можливих шляхів задоволення потреб бізнесу;

- аналіз потенційної цінності та рекомендацію рішення, що передбачає оцінювання бізнес-цінності, пов'язаної з потенційним рішенням, і порівняння

різних варіантів, зокрема компроміси, для визначення та рекомендації варіанта рішення, що приносить найбільшу загальну користь.

За кожним із перелічених завдань закріплюється певний результат, на досягнення якого спрямована діяльність бізнес-аналітика: (1) визначені та змодельовані вимоги, (2) верифіковані вимоги, (3) валідовані вимоги, (4) архітектура вимог, (5) варіанти дизайну, (6) рекомендації рішення. У цьому разі, з огляду на змістовне подання вимог, результатом, що формалізує, візуалізує та підсумовує результати (1)–(3) та (5), (6), є саме архітектура вимог. Архітектура вимог використовується також і в інших бізнес-аналітичних завданнях: пріоритезація вимог, оцінювання їх змін, виокремлення та моделювання вимог, визначення варіантів дизайну [6], а також у процесі комунікації бізнес-аналітичної інформації, підтримки вимог в актуальному стані, трасуванні, затвердженні вимог тощо. Повний набір вимог та зв'язків між ними (архітектура вимог) використовується у визначенні варіантів дизайну, що здатні задовольнити весь набір вимог [1]. Вимоги зосереджуються на потребах, а дизайн – на рішенні. Різниця між вимогами та дизайном не завжди очевидна, бо для виявлення, моделювання та аналізу вимог і дизайну впроваджуються одні й ті самі техніки.

На архітектуру вимог автори ВАВОК звертають увагу в третій версії стандарту, виокремлюючи активність із визначення архітектури в окреме завдання. Також у глосарії третьої версії стандарту сформульовано відповідне визначення [5]: архітектура вимог – "вимоги щодо ініціативи та взаємозв'язки між ними". Це структура всіх вимог, метою якої є сумісне забезпечення вимогами досягнення цілей. Архітектура вимог поєднує окремі моделі та специфікації для гарантії того, що всі вимоги є єдиною системою, спрямованою на досягнення бізнес-мети та отримання цінності зацікавленими сторонами. Автори ВАВОК другої версії для узгодження поглядів різних зацікавлених сторін пропонували формувати документ із вимогами (*Requirements Document, Requirements Package*), який визначався як набір вимог, згрупований у документ чи презентацію для взаємодії із стейкхолдерами. У ВАВОК третьої версії *Requirements Package* також визначається як артефакт бізнес-аналізу. Водночас архітектура вимог, зважаючи на визначення, призначена для того, щоб показати, як елементи співпрацюють разом для підтримки бізнес-вимог, і структурувати їх для узгодження різних поглядів

зацікавлених сторін. Тут постає очевидне важливе питання, яке автори статті пропонують розглянути: чи є архітектура вимог альтернативою, частиною або містить пакет вимог (*Requirements Package*), а якщо ні, то якого значення архітектура набуває в контексті вимог до програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Глосарій BABOK надає широке визначення архітектури вимог (*requirements architecture*), уникаючи термінів "структура", "система", "документ" та будь-які обмеження щодо "вимог", які б додали змістовності цьому поняттю та уможливили його

використання як трафарету до архітектури вимог до програмного забезпечення. У праці [7] зазначено, що "архітектура вимог передбачає визначення того, як будуть згруповані та пов'язані вимоги й набори вимог до програмного забезпечення". У наведеному визначенні варто звернути увагу на термін "набір вимог", що містить не лише вимоги та зав'язки між ними, але й певні об'єкти.

Як бачимо, контекст уточнює термін, додаючи певні обмеження. З цього аспекту важливо зрозуміти спочатку контекст, у якому сформулюються вимоги, а вже потім визначатися з тим, що таке архітектура цих вимог, зважаючи, що вибір фреймворку / методології безпосередньо впливає на її формування (рис. 1).

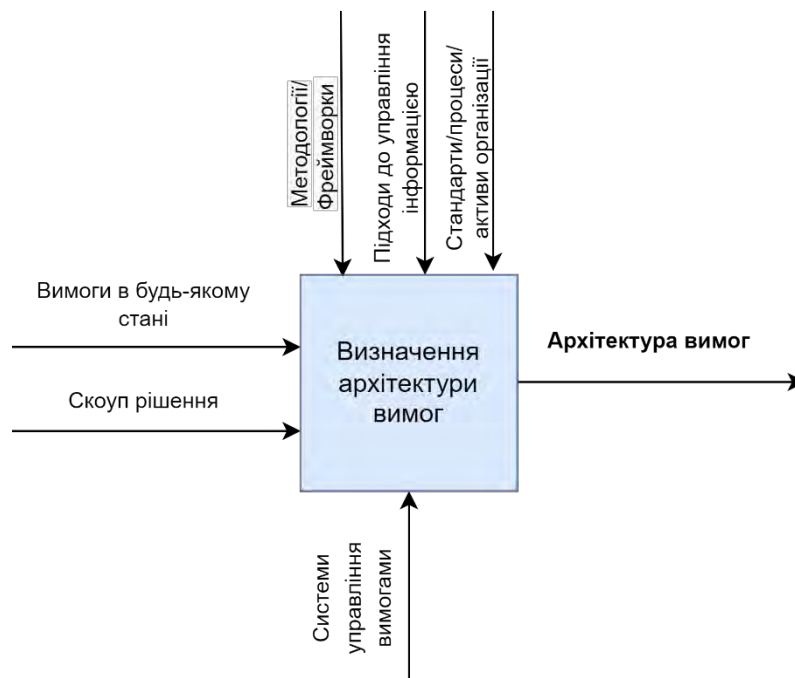


Рис. 1. Контекстна діаграма "Визначення архітектури вимог" [1]

Більшість досліджень, спрямованих на вивчення сучасних практик роботи бізнес-аналітика під час документування вимог, зосереджені на підходах та техніках опису вимог і елементів дизайну, і не розглядають їх у сукупності як пов'язану структуру. У праці [8] досліджено поточні практики в українській IT-індустрії щодо використання технік аналізу й моделювання вимог і впливу на них контексту проекту. У межах дослідження виявлено найбільш популярні техніки бізнес-аналізу, призначені для створення елементів архітектури вимог – діаграми класів, діаграми бізнес-процесів, сценарії використання. У роботі [9] проаналізовано сумісне

використання цих моделей, але встановлення зв'язків між ними не вивчалось. Результати дослідження щодо змісту документів "Специфікація вимог до програмного забезпечення" в польській IT-індустрії подані в статті [10]. У цьому дослідженні підтверджено, що зміст специфікацій вимог залежить від предметної галузі проекту, методу фінансування, обраної методології, а найчастішим елементом у документах є опис вимог щодо інтеграції із зовнішніми системами. Також вивчалися підходи до трасування вимог, що дає змогу відстежувати взаємні залежності між вимогами, результатами виявлення, тест-кейсами, архітектурними рішеннями

та кодом. У роботі [11] наведені результати систематичного огляду досліджень, присвячених трасуванню вимог на джерела їх походження (протоколи робочих зустрічей, результати інтерв'ю та аналізу наявних систем). За результатами дослідження виявлено, що найбільш критичними проблемами, які виникають під час трасування вимог, є неадекватна підтримка версій посилань трасування, погана адаптованість для конкретних потреб проєкту та відсутність довіри до можливо неправильно створених посилань. Останні дві проблеми безпосередньо пов'язані з інтеграцією трасування в архітектуру вимог. У роботі [12] досліджено питання взаємозв'язків між документами вимог і сформульовано концептуальну модель *T-Reqs*, що допомагає описати відношення різних типів між документами. Автори наголошують, що їхня модель є здебільшого теоретичною та її перевірка в межах проєктної діяльності є наступним етапом розвитку.

Визначення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

Вимоги є вхідною інформацією для визначення архітектури, але водночас існує зворотний зв'язок: архітектура вимог впливає на визначення та моделювання вимог. Тому доцільно в межах цієї статті дослідити підходи до розуміння вимог у процесі розроблення програмного забезпечення, загальноприйнятій класифікації вимог і характеристики якісних вимог із подальшою логічною проєкцією вивченого контексту на архітектуру вимог та запропонувати визначення поняття "архітектура вимог".

Мета дослідження – надати визначення архітектурі вимог до ІТ-рішення для кращого розуміння та подальшого впровадження цього концепту в практику розроблення програмного забезпечення.

Завдання дослідження: проаналізувати підходи до класифікації вимог з метою виокремлення спільних і відмінних характеристик та їх впливу на розуміння архітектури вимог; проаналізувати стандарти з інженерії вимог для пошуку визначення та будь-яких зв'язків з архітектурою вимог; розглянути підходи до побудови набору вимог і використання шаблонів для їх опису з метою виявлення оптимальних стратегій для бізнес-аналітичних процесів та їх впливу на архітектуру вимог.

Матеріали й методи

Під час пошуку та надання власного визначення архітектурі вимог до ІТ-рішення використані методи компаративного аналізу, зокрема порівняння та узагальнення різних класифікацій вимог з огляду на їх вплив на визначення архітектури вимог, методи аналізу та узагальнення підходів до інженерії вимог для виявлення їх впливу на процес формування архітектури вимог, методи системного аналізу понять "вимога" та "архітектура вимог", а також методи порівняння та аналогій у вивченні питання використання шаблонів для опису вимог у контексті побудови архітектури вимог. Крім того, використаний метод аналогового моделювання для виявлення зв'язків між якістю вимог та їх архітектурою, що дав змогу визначити оптимальні підходи до побудови архітектури вимог, які відповідають вимогам якості програмного забезпечення.

Результати досліджень та їх обговорення

Вимога – це твердження, що перекладає або виражає потребу й пов'язані з нею обмеження та умови [2]. К. Вігерс у роботі [13] дає більш повне визначення цього терміна: "Вимоги – це специфікація того, що має бути реалізовано. У них описана поведінка системи, її властивості чи атрибути, що можуть використовуватися як обмеження під час розроблення системи". Вимоги декомпонують та уточнюють, трансформуючи бізнес-вимоги у функціональні та нефункціональні.

У табл. 1 наведена класифікація вимог за К. Вігерсом [13] та сукупністю знань з бізнес-аналізу BABOK [1], PMI [14], IREB [3].

Отже, вимоги до програмного забезпечення містять три рівні: бізнес-вимоги, користувацькі та функціональні й нефункціональні вимоги. На кожному рівні вимоги документуються, але документ – це необов'язково паперовий чи електронний документ; це контейнер, де зберігаються знання про вимоги [13] (рис. 2).

К. Вігерс використовує конкретні назви артефактів для документації вимог, але водночас наголошує, що назви в таких контейнерах можуть бути різними, важливо – це досягти домовленості, які види інформації міститимуться в них та як ця інформація буде організована.

Таблиця 1. Класифікація вимог

PMI (у частині вимог до продукту)	BAVOK	IREB (у частині вимог до продукту)	К. Вігерс
<u>Бізнес-вимога</u> (визначення відсутнє).	<u>Бізнес-вимога</u> – формулювання цілей, завдань і результатів, що описують, чому зміна була ініційована.	<u>Бізнес-вимога</u> – вимога, основана на бізнес-меті, завданнях або потребах, що мають бути досягнуті за допомогою використання системи або комплексу систем.	<u>Бізнес-вимога</u> – високорівнева бізнес-мета підприємства чи замовника.
<u>Вимоги зацікавленої сторони</u> (визначення відсутнє).	<u>Вимоги зацікавленої сторони</u> – описують потреби зацікавлених сторін, які необхідно задовольнити, щоб виконати бізнес-вимоги.	–	<u>Вимоги зацікавленої сторони</u> – завдання, які певні класи користувачів мають змогу вирішувати в системі, або певні атрибути продукту.
–	<u>Системні вимоги</u> передбачають функціональні та нефункціональні вимоги.	–	<u>Системні вимоги</u> – вимоги верхнього рівня до продукту, що містить багато підсистем (ПЗ) чи ПЗ та обладнання.
–	<u>Функціональні вимоги</u> – описують можливість, що має рішення з погляду поведінки та інформації, з якою рішення працюватиме.	<u>Функціональні вимоги</u> – опис результату або поведінки, що мають бути реалізовані функціями системи.	<u>Функціональні вимоги</u> – опис поведінки системи, що необхідна в певних умовах.
<u>Вимоги до якості</u> (визначення відсутнє).	<u>Нефункціональні вимоги</u> , чи вимоги до якості сервісу – описують умови, за яких рішення має залишатися функціональним, або якості, необхідні для рішення.	<u>Вимоги до якості (нефункціональні обмеження)</u> – вимоги, що описують обмеження / проблеми, не охоплені функціональними вимогами.	<u>Нефункціональні вимоги</u> – опис властивостей чи особливостей, необхідних для системи, або обмеження, яким має відповідати (виконувати) система. <u>Атрибути якості</u> – вид нефункціональних вимог, що описують характеристику сервісу або продуктивності продукту.
–	<u>Перехідні вимоги</u> (вимоги перехідного періоду) – описують можливості, необхідні для рішення, або умови, яким воно має відповідати, щоб забезпечити перехід із поточного стану в майбутній.	–	–

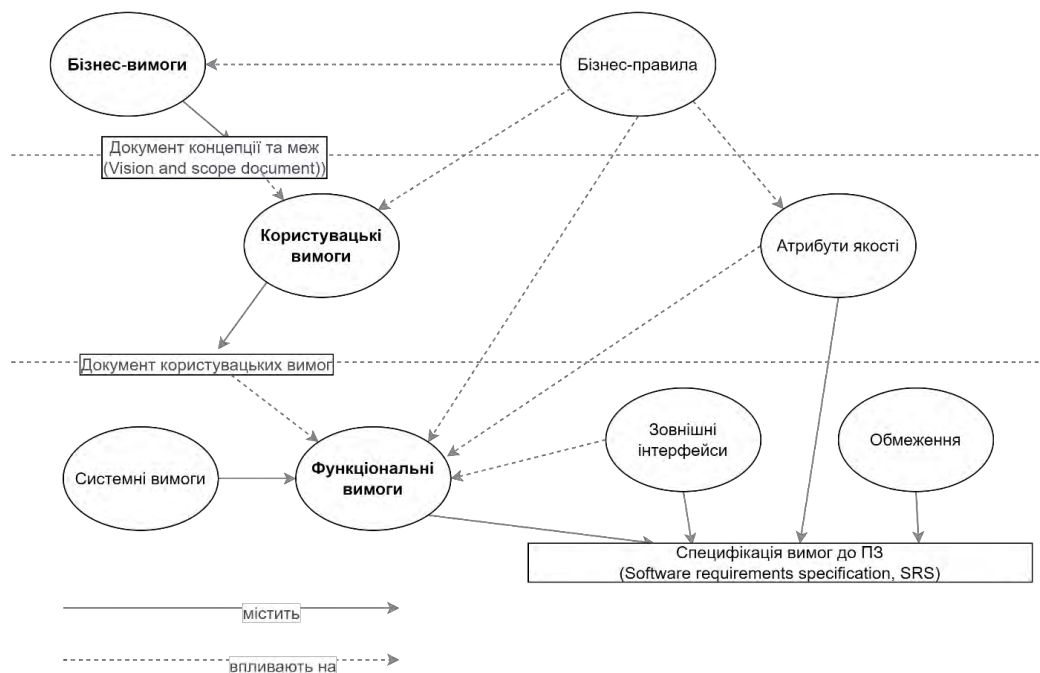


Рис. 2. Зв'язок типів інформації для формування вимог [13]

На практиці використовують різні способи організації інформації про вимоги (табл. 2): від написаних природною мовою детальних специфікацій до опису вимог формальною мовою.

Крім зазначених стандартних підходів до опису вимог (табл. 2), поступово в практику впроваджуються й новітні підходи до опису вимог та використання шаблонів. Наприклад, у роботі [16] автори пропонують неконтрольований підхід до розпізнавання шаблонів

для опису вимог із допомогою визначення загальних синтаксичних структур вимог.

На вибір способу подання вимог впливає методологія розроблення програмного забезпечення, а також стандарти, яких дотримується організація-розробник чи які визначені замовником. Крім способу подання вимог, методології та деякі стандарти визначають артефакти (контейнери), у яких зберігаються вимоги (табл. 3).

Таблиця 2. Способи подання вимог

Формат опису вимог	Приклади подання вимог
Документація, у якій використовується чітко структурована природна мова [Natural Language Processing for Requirements Engineering] (INCOSE). Easy Approach to Requirements Syntax (EARS) – нотація, призначена для полегшення запису та документування вимог у чіткій і стислій формі за допомогою природної мови [15].	Software requirements specification Use case User story
Графічні моделі, що ілюструють процеси трансформації стану системи та їх зміни, взаємодії даних, логічні потоки, класи об'єктів і відношення між ними.	Use-case diagram Data Flow Diagram Context Diagram Business Process Model Business Model Canvas Lean Model Canvas
Формальні специфікації, де вимоги визначені за допомогою математично точних, формальних логічних мов.	Vienna Development Method Spec# RAISE Specification Language

Таблиця 3. Артефакти, у яких зберігаються вимоги

Підхід / методологія / фреймворк	Артефакти	Архітектурний елемент
Waterfall	Software requirements specification	Use case Графічні моделі
RUP (Rational Unified Process)	Software requirements specification	Use case User Story Графічні моделі
SCRUM	Product Backlog Roadmap	User Story
SAFe (Scaled Agile Framework)	Product Backlog Roadmap	User Story Enabler Story
ISO/IEC/IEEE	Stakeholder requirements specification System requirements specification Software requirements specification Software quality assurance plan	Use case Структурований опис природною мовою

Як бачимо з табл. 3, результатами бізнес-аналітичної діяльності найчастіше стають такі артефакти, як *Software requirements specification* (специфікація вимог до програмного забезпечення) та *Product Backlog* (беклог продукту), а як архітектурні елементи цих артефактів застосовуються *Use case* (сценарії використання), графічні моделі та *User Story* (користувачка історія) з обов'язковим визначенням зав'язків і залежностей. У цьому разі вимоги до якості програмного забезпечення можуть описуватися за допомогою власних специфічних артефактів [17].

У зазначеному контексті доречно навести ще один термін з праці [1], а саме "структура вимог".

Структура вимог (*Requirements Structure*) дає змогу отримувати вимоги на різних рівнях абстракції чи деталізації та вказує на необхідність установаження логіки вимог. Як приклад, у табл. 4 наведена структура вимог для *Waterfall*- та *Agile*-підходів [18, 19].

Жорсткість і стиль документації безпосередньо залежать від мети та контексту, у якому документація створюється. Наприклад, *Waterfall*-методологія зазвичай передбачає побудову детальної специфікації вимог. *ISO/IEC/IEEE* надає таке визначення специфікації вимог до програмного забезпечення: *Software requirements specification* – структурований набір основних вимог (функцій, продуктивності,

проектних обмежень та атрибутів) програмного забезпечення та його зовнішніх інтерфейсів [2]. Згідно з *IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specification*, документ *SRS* має містити детальні вимоги й відповідати певному набору критеріїв якості. Звісно, дотримання рекомендацій та вимог стандартів до побудови *SRS* не завжди

є обов'язковою умовою розроблення програмного забезпечення, але застосування шаблонів, побудованих за певними стандартами, значно полегшує бізнес-аналітичну роботу та підтримує якість її результатів [20]. Для побудови якісної *SRS* у стандартах визначені певні умови та рекомендації (табл. 5).

Таблиця 4. Структура вимог

Рівень	<i>Waterfall</i>	<i>Agile</i>	Акцент
<i>V High</i>	Бізнес-цілі	Бізнес-цілі	Отримання цінності
<i>High</i>	Бізнес-вимоги	Епіки	Планування
<i>Mid</i>	Вимоги стейкхолдерів	<i>User story</i>	Розуміння потреб стейкхолдерів
<i>Low</i>	Вимоги до програмного забезпечення	<i>Task / Acceptance criteria</i>	Допомога розробникам у проектуванні рішення

Таблиця 5. Аналіз стандартів (вимоги до документації)

Документація	Вимоги до документації	Стандарт
1	2	3
Вимоги до програмного забезпечення		
<i>Software Requirements Specifications.</i>	Коректність (<i>Correct</i>); однозначність (<i>Unambiguous</i>); завершеність (<i>Complete</i>); послідовність (<i>Consistent</i>); пріоритетованість (<i>Ranked for importance and/or stability</i>); можливість перевірки (<i>Verifiable</i>); можливість змін (<i>Modifiable</i>); відстежуваність (<i>Traceable</i>).	<i>Recommended Practice for Software Requirements Specifications. IEEE Std 830-1998.</i>
<i>Stakeholder requirements specification, System requirements specification, Software requirements specification.</i>	Стандарт визначає структуру документа, характеристики якісних вимог, характеристики набору вимог.	<i>ISO/IEC/IEEE 29148:2018(en) Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering.</i>
Вимоги до якості програмного забезпечення		
Документ з вимогами – "документ, що містить будь-яку комбінацію вимог або правил, що необхідно виконати за допомогою готового для застосування програмного продукту (<i>RUST</i>)". Ці документи можуть бути технічними звітами, стандартами, переліком вимог (або специфікацією моделі вимог) для різних типів користувачів або статутом чи положенням, введеним керівним або регулювальним органом.	Повнота: достатність інформації для забезпечення якісного використання програмного забезпечення. Коректність: відповідність вимогам основних цільових користувачів. Узгодженість: відсутність суперечностей у межах документа та з іншими документами, наприклад, описом продукту. Зрозумілість: зрозумілість для широкого кола користувачів із застосуванням термінології та стилю, зрозумілих спеціальній аудиторії.	ДСТУ <i>ISO/IEC 25051:2016</i> . Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання (<i>SQuaRE</i>). Вимоги до якості готового для застосування програмного продукту (<i>RUSP</i>) та інструкції щодо його тестування (<i>ISO/IEC 25051:2014, IDT</i>).
Шаблон плану проекту з оцінювання якості, що містить вимоги до якості програмних засобів і систем, а також інші вимоги. Джерелом інформації для цього розділу є специфікація вимог до якості програмних засобів або систем(и).	Ефективність специфікації вимог до якості.	ДСТУ <i>ISO/IEC 25001:2016</i> . Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання (<i>SQuaRE</i>). Планування та керування (<i>ISO/IEC 25001:2014, IDT</i>).

Продовження таблиці 5

1	2	3
Моделі якості, які можна застосовувати для визначення вимог, валідування повноти визначення вимог. Специфікація вимог до якості.	Прямих вимог до документації не вказано. Доречно виокремити характеристику якості програмного продукту, що можна перекласти на вимоги до документації: <i>покриття контексту</i> . Підхарактеристики: <i>повнота контексту</i> (важливо, щоб продукт був використаний у всіх необхідних умовах застосування) та <i>гнучкість</i> (дає змогу застосовувати продукт у нових умовах). Вилучено підхарактеристику "відповідність", оскільки відповідність нормам і правилам є складником загальних вимог системи, а не складником власне якості. Але цю підхарактеристику доречно спроектувати на документацію, зважаючи що "вимога має пристосовувати модель, обґрунтовуючи будь-які зміни".	ДСТУ ISO/IEC 25010:2016. Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання (<i>SQuaRE</i>). Моделі якості системи та програмних засобів (<i>ISO/IEC 25010:2011, IDT</i>).
Документація, що містить вимоги до якості систем програмних засобів.	Вимоги щодо відповідності нормам і правилам можуть використовуватись для формування вимог, але вони виходять за межі вимог до якості.	ДСТУ ISO/IEC 25022:2019. Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем програмних засобів та їх оцінювання (<i>SQuaRE</i>). Вимірювання якості під час застосування (<i>ISO/IEC 25022:2016, IDT</i>).
Документація, що містить вимоги до якості систем програмних засобів.	Якість системи / програмного продукту – це рівень відповідності заявленим та очікуваним потребам різних груп стейкхолдерів, що дає змогу отримати цінність.	ДСТУ ISO/IEC 25023:2019. Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем програмних засобів та їх оцінювання (<i>SQuaRE</i>). Вимірювання якості систем та програмних продуктів (<i>ISO/IEC 25023:2016, IDT</i>).

Крім рекомендацій щодо структури *SRS* та вимог до побудови структурованого документа, у стандартах також подано приклади синтаксису вимог, визначено характеристики якісних вимог, а в *ISO29148* наведено ознаки якісного набору вимог. У документі [2] набір вимог поданий як цілісна система, що має відповідати певним характеристикам і забезпечувати досягнення конкретної мети, а отже, вочевидь, має ознаки архітектури вимог. Стандарт наводить такі характеристики набору вимог: повнота (*Complete*, набір вимог не потребує подальшого розширення, оскільки містить усе необхідне для визначення системи або системного елемента), послідовність (*Consistent*, відсутні суперечності та дублювання вимог, використовується єдина термінологія), доступність (*Affordable*, повний набір вимог може бути реалізований як рішення з огляду на наявні умови), обмеженість (*Bounded*, набір вимог не виходить за межі того, що достатнє для задоволення потреб користувача). Зазначений підхід до побудови набору вимог відповідає методології *Waterfall* і дає змогу їх

ретельно перевірити для уникнення змін і зростання вимог ("розповзання вимог") упродовж життєвого циклу, що може вплинути на вартість, графік або якість системи.

Гнучкі ж підходи підтримують мінімально достатню документацію, яка створюється відповідно до потреби, а не за визначеними моделями документації. Цей підхід допомагає документам ефективно враховувати зміни, зберігаючи водночас низькі витрати на їх розроблення та підтримку. Проте обов'язкова документація, необхідна для аудиту чи регуляторної звітності, наявна в кожному циклі постачання. Важливо, щоб документи відповідали виявленим потребам і приносили цінність, яка перевищує витрати на їх розроблення та підтримку. Але умова щодо якості вимог і якості набору вимог, що міститимуться в цих документах, зберігається. Для оцінювання якості вимог, описаних у форматі *user story*, використовуються критерії INVEST: *I* – *Independent* – незалежність, *N* – *Negotiable* – обговорюваність (дискусійність), *V* – *Valuable* – цінність,

E – *Estimable* – вимірність, *S* – *Small* – маленький розмір, *T* – *Testable* – можливість протестувати / перевірити [21]. З детальним описом викликів щодо розроблення якісних вимог у проєктах гнучкого розроблення можна ознайомитися в роботах [23, 25].

Про важливість документування вимог під час реалізації різних підходів до виконання бізнес-аналітичних завдань наголошується і в праці [24]. Кожна вимога документується, щоб чітко визначити, що потрібно реалізувати, на основі цих вимог формується відповідний каталог / набір вимог, повнота якого залежить від організаційних стандартів і підходів до змін. Як зазначалось вище, набір вимог формує пакет вимог, який не завжди є офіційним документом. Це можуть бути історії користувачів і пов'язана інформація. Формальність і рівень деталізації в пакеті вимог залежать від життєвого циклу проєкту та інтересів зацікавлених сторін, що визначаються під час планування [14]. Схожі завдання виконує і архітектура вимог, що описує вимоги, моделі та іншу інформацію про продукт або пов'язані елементи.

З огляду на результати проведеного аналізу необхідно зазначити наявність визначених / запропонованих характеристик якості вимог, наявність визначених / запропонованих ознак якісного набору вимог, наявність визначених / запропонованих вимог до структури документів, що містять інформацію про вимоги до програмного забезпечення. Зважаючи на контекстну діаграму "Визначення архітектури вимог" (рис. 1), усе це дає змогу забезпечити якість вхідних параметрів для побудови архітектури вимог.

ВАВОК [1] наголошує, що кожна вимога має бути сформульована один раз і додана до архітектури вимог так, щоб весь набір можна було оцінити на предмет повноти. Крім того, архітектура вибудовується з огляду на *точки зору* (*viewpoints*), наборів угод / домовленостей, що визначають, як подаються вимоги, як вони організуються та як будуть пов'язані. Також *точки зору* мають брати до уваги інтереси певних груп зацікавлених сторін, а набір скоординованих взаємоповнених *точок зору* забезпечуватиме основу для оцінювання повноти та зв'язності вимог.

Точки зору можуть передбачати стандарти, моделі даних, нотації, моделі бізнес-процесів, варіанти використання та/або досвід користувача (*user experience*) тощо.

Отже, *точка зору* – спосіб / формат надання інформації зацікавленим особам з огляду на їх інтереси; *подання* – це опис фактичних вимог чи дизайнів відповідно до певної точки зору. *Подання вимог* (*Views on requirements*) є складником системи управління вимогами та застосовуються для валідації вимог до програмного забезпечення [3].

Архітектура допомагає переконатися, що набір вимог повний, завдяки структуруванню вимог відповідно до різних *точок зору*. У наборі не має бути втрачених, несумісних з іншими вимог, або вимог, що суперечать одна одній. Архітектура вимог має брати до уваги будь-які залежності між вимогами, що можуть стати на заваді досягненню цілей зацікавлених сторін. Крім того, компонентом архітектури вимог є архітектура інформації, оскільки вона описує, як пов'язана вся бізнес-аналітична інформація, і визначає взаємовідносини таких видів інформації, як вимоги, дизайни, типи моделей і результати виявлення. Для побудови архітектури вимог використовуються архітектурні фреймворки – сукупність *точок зору*, стандартних для галузі, галузевого сектора або організації, наприклад, заздалегідь установлені шаблони, з яких можна розпочати визначення архітектури.

Як бачимо, наведені у ВАВОК підходи до побудови архітектури вимог досить узагальнені й не завжди корелюють із галузевими стандартами, наприклад, з *ISO29148* щодо опису дизайну в структурі *SRS*. Також на момент написання статті авторам не вдалося знайти рекомендацій та кращих практик побудови якісної архітектури вимог до програмного забезпечення, а також загальноприйнятого визначення поняття "архітектура вимог до програмного забезпечення".

Отже, за результатами аналізу вхідних параметрів, можливих архітектурних елементів і вимог до їх якості, наявних загальних рекомендацій щодо побудови набору вимог пропонується надати визначення поняттю "архітектура вимог".

Розглянемо спочатку етимологію поняття "архітектура". "Архітектура (лат. *architectura*, від грец. *ἀρχιτέκτων* – провідний будівничий) – зодчество, мистецтво зводити будівлі відповідно до вимог міцності, краси й доцільності; у ширшому значенні – частина матеріальної культури (самі споруди), сфера матеріального виробництва" [25]. З погляду системного аналізу з цього визначення виокремимо складну систему – "культуру", її структурні елементи – "споруди", умови функціонування – "відповідність

вимогам", спроектуємо їх на архітектуру вимог та її архітектурні елементи – *подання*, та на цій основі надамо визначення архітектурі вимог до програмного забезпечення. Також у формулюванні визначення взято до уваги, що архітектура вимог використовується для розуміння, які моделі підходять для предметної галузі, допомагає організувати вимоги до структур відповідно до груп зацікавлених сторін, забезпечує візуалізацію взаємодії та залежностей вимог, а також загальну спрямованість вимог на досягнення спільних цілей і прийняття компромісних рішень щодо вимог.

Архітектура вимог – це організована з огляду на контекст і бачення зацікавлених сторін сукупність різноманітного *подання*, що дає змогу висувати вимоги до продукту (програмного забезпечення) як до цілісної системи.

Доречно звернути увагу на такі припущення:

1) архітектура вимог може передбачати / базуватися на використанні певних шаблонів документів, але не обмежується ними;

2) дизайн є елементом архітектури.

У контексті цієї статті зазначені припущення подаються авторами без доведення та обґрунтування і стануть предметом наступних досліджень.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Досліджуючи поняття "архітектура вимог" як бізнес-аналітичного продукту, автори статті пройшли

шлях від систематизації та узагальнення різноманітних підходів до визначення поняття до виокремлення його сутності в контексті розроблення програмного забезпечення. Результати аналізу показали, що архітектура вимог відіграє важливу роль у забезпеченні повноти, узгодженості та якості вимог, а також у розумінні потреб зацікавлених сторін. Виявлено, що архітектура вимог може базуватися на різних архітектурних фреймворках, залежить від методологій розроблення програмного забезпечення, але водночас вона може варіюватися залежно від галузевих стандартів і потреб конкретного проекту. Також архітектура вимог може використовувати певні шаблони документів, проте вона не обмежується ними.

Крім того, проведені дослідження довели необхідність подальшої роботи в цій сфері, бо відкритими залишаються питання стандартизації поняття "архітектура вимог" та розроблення рекомендацій щодо його практичного застосування. Надалі можливе розширення дослідження щодо аналізу впливу архітектури вимог на процес розроблення програмного забезпечення та його якості. Також важливо провести порівняльний аналіз різних методів та інструментів побудови архітектури вимог для виявлення найефективніших підходів. Загалом подані в статті здобутки відкривають перспективи для подальших досліджень у частині побудови архітектури вимог, що має значний потенціал для вдосконалення процесів розроблення програмного забезпечення та підвищення його якості.

Список літератури

1. A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge® (BABOK® Guide). International Institute of Business Analysis, Toronto, Ontario, Canada, 2015. 514 p.
2. Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. ISO/IEC/IEEE 29148:2018(en). URL: <https://doi.org/10.3403/30295695u> (дата звернення: 10.12.2023).
3. Pohl K. Requirements engineering: fundamentals, principles, and techniques. *Springer Publishing Company*. 2010. 182 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.5860/choice.48-3304>
4. Lind E., Gonzalez-Huerta J., Alégroth E. Requirements Quality vs. Process and Stakeholders' Well-Being: A Case of a Nordic Bank. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2023. № 472. P. 17–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31488-9_2
5. BABOK® Guide v3 Glossary – Ukrainian Translation. URL: <https://www.iiba.org/globalassets/standards-and-resources/glossary/files/babok-v3-glossary-ukrainian.pdf> (дата звернення: 10.12.2023).
6. Gobov D., Yanchuk V. Network Analysis Application to Analyze the Activities and Artifacts in the Core Business Analysis Cycle. *Proceedings of the 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*. IEEE. 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IISEC54230.2021.9672373>
7. Diev S. Structuring complex requirements. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*. 2007. №32(2). P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1145/1234741.1234755>
8. Gobov D., Huchenko I. Modern Requirements Documentation Techniques and the Influence of the Project Context: Ukrainian IT Experience. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. vol 134. P. 260–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_22

9. Gobov D. Practical Study on Software Requirements Specification and Modelling Techniques. *International Journal of Computing*. 2023. №22(1). P. 78-86. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.22.1.2882>
10. Rączkowska-Gzowska K., Walkowiak-Gall A. What Should a Good Software Requirements Specification Include? Results of a Survey. *Foundations of Computing and Decision Sciences*. 2023. № 48(1). P. 57–81. DOI: 10.2478/fcds-2023-0004
11. Mucha J., Kaufmann A., Riehle D. A systematic literature review of pre-requirements specification traceability. *Requirements Engineering*. 2024. №1. P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00412-z>
12. Großer K., Riediger V., Jürjens J. Requirements document relations: A reuse perspective on traceability through standards. *Software and Systems Modeling*. 2022. №21(6). P. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00958-y>
13. Wiegers K., Beatty J. *Software Requirements (Developer Best Practices)*. 3rd Edition, Microsoft Press, 2013, 672 p.
14. The PMI Guide to Business Analysis. Project Management Institute, Inc, Newtown Square, Pennsylvania, 2018. 444 p.
15. Gregory S. Requirements for the New Normal: Requirements Engineering in a Pandemic. *IEEE Software*. 2021. vol. 38, No. 2. P. 15–18. DOI: 10.1109/MS.2020.3044403
16. Sonbol R., Rebdawi G., Ghneim N. Learning software requirements syntax: An unsupervised approach to recognize templates. *Knowledge-Based Systems*. 2022. Volume 248. 108933 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108933>
17. Frattini K, et.al. Requirements quality research: a harmonized theory, evaluation, and roadmap. *Requirements engineering*. 2023. Volume 28. P. 507–520. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00766-023-00405-y>
18. Noreika K., Gudas S. Causal Knowledge Modelling for Agile Development of Enterprise Application Systems. *Informatica*. 2023. №34(1). P. 121–146. DOI: 10.15388/23-INFOR510
19. Palomares C., et. al. The state-of-practice in requirements elicitation: an extended interview study at 12 companies. *Requirements Engineering*. 2021. №26. P. 273–299. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00399-7>
20. Gobov D., Zuieva O. Identifying the dependencies between it project context and business analysis document content. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023. №2(24). P. 39–53. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.039
21. Dellsén E., Westgårdh K., Horkoff J. Invest in Splitting: User Story Splitting Within the Software Industry. *Lecture Notes in Computer Science*. 2022. Vol 13216. P. 115-130. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98464-9_10
22. Rasheed A., et. al. Requirement Engineering Challenges in Agile Software Development. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Volume 2021. Article ID 6696695. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6696695>
23. Atoum I, et.al. Challenges of Software Requirements Quality Assurance and Validation: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 137613–137634. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3117989>
24. Paul D., Cadle J., Yeates D. (editors). *Business Analysis. Third edition*, British Computer Society, 2014. 401 p.
25. С. К. Кілессо. Архітектура. *Енциклопедія сучасної України*. [Електронний ресурс] за ред.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. К.: *Інститут енциклопедичних досліджень НАН України*, 2001. URL : <https://esu.com.ua/article-44834>

References

1. A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge® (BABOK® Guide). International Institute of Business Analysis, Toronto, Ontario, Canada, 2015. 514 p.
2. Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. ISO/IEC/IEEE 29148:2018(en). available at: <https://doi.org/10.3403/30295695u> (last accessed: 10.12.2023).
3. Pohl, K. (2010), "Requirements engineering: fundamentals, principles, and techniques". *Springer Publishing Company*. 182 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.5860/choice.48-3304>
4. Lind, E., Gonzalez-Huerta, J., & Alégroth, E. (2023), "Requirements Quality vs. Process and Stakeholders' Well-Being: A Case of a Nordic Bank". *Proceedings of International Conference on Software Quality*, P. 17–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31488-9_2
5. International Institute of Business Analysis. "BABOK® Guide v3 Glossary – Ukrainian Translation", available at: <https://www.iiba.org/globalassets/standards-and-resources/glossary/files/babok-v3-glossary-ukrainian.pdf> (last accessed: 10.12.2023).
6. Gobov, D., Yanchuk, V. (2021), "Network Analysis Application to Analyze the Activities and Artifacts in the Core Business Analysis Cycle", *Proceedings of the 2nd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*, IEEE. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IISEC54230.2021.9672373>
7. Diev, S. (2007), "Structuring complex requirements", *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, №32(2), P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1145/1234741.1234755>

8. Gobov, D., Huchenko, I. (2022), "Modern Requirements Documentation Techniques and the Influence of the Project Context: Ukrainian IT Experience", *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Vol 134, P. 260–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_22
9. Gobov, D. (2023), "Practical Study on Software Requirements Specification and Modelling Techniques", *International Journal of Computing*, №22(1), P. 78–86. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.22.1.2882>
10. Rączkowska-Gzowska, K., Walkowiak-Gall, A. (2023), "What Should a Good Software Requirements Specification Include? Results of a Survey", *Foundations of Computing and Decision Sciences*, № 48(1), P. 57–81. DOI: 10.2478/fcds-2023-0004
11. Mucha, J., Kaufmann, A., Riehle, D. (2024), "A systematic literature review of pre-requirements specification traceability", *Requirements Engineering*, №1, P. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00412-z>
12. Großer, K., Riediger, V., Jürjens, J. (2022), "Requirements document relations: A reuse perspective on traceability through standards", *Software and Systems Modeling*, №21(6), P. 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-021-00958-y>
13. Wiegers K., Beatty J. (2013), *Software Requirements (Developer Best Practices). 3rd Edition*. Microsoft Press, 672 p.
14. Project Management Institute (2018), *The PMI Guide to BUSINESS ANALYSIS*. PMI, Newtown Square, Pennsylvania, 444 p.
15. Gregory, S. (2021), "Requirements for the New Normal: Requirements Engineering in a Pandemic", *IEEE Software*, vol. 38, No. 2, P. 15–18. DOI: 10.1109/MS.2020.3044403
16. Sonbol, R., Rebdawi, G., Ghneim, N. (2022), "Learning software requirements syntax: An unsupervised approach to recognize templates", *Knowledge-Based Systems*, Volume 248, 108933 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108933>
17. Frattini, K., et.al. (2023), "Requirements quality research: a harmonized theory, evaluation, and roadmap", *Requirements engineering*, Volume 28. P. 507–520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00405-y>
18. Noreika, K., Gudas, S. (2023), "Causal Knowledge Modelling for Agile Development of Enterprise Application Systems", *Informatica*. №34(1). P. 121–146. DOI: 10.15388/23-INFOR510
19. Palomares, C., et. al. (201), "The state-of-practice in requirements elicitation: an extended interview study at 12 companies", *Requirements Engineering*. №2. P. 273–299. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00766-023-00399-7>
20. Gobov, D., Zuieva, O. (2023), "Identifying the dependencies between it project context and business analysis document content", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, №2 (24), P. 39–53. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.039
21. Dellsén, E., Westgårdh, K., Horkoff, J. (2022), "Invest in Splitting: User Story Splitting Within the Software Industry", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 13216, P. 115–130. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98464-9_10
22. Rasheed, A., et. al. (2021), "Requirement Engineering Challenges in Agile Software Development", *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2021, Article ID 6696695. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6696695>
23. Atoum, I., et.al. (2021), "Challenges of Software Requirements Quality Assurance and Validation: A Systematic Literature Review", *IEEE Access*, Vol. 9, P. 137613–137634. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3117989>
24. Paul, D., Cadle, J., Yeates, D. (2014), *Business Analysis. Third edition*, British Computer Society, 401 p.
25. Kileso, S.K. (2001), "Architecture. Encyclopedia of Modern Ukraine", edited by: I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak [and others], National Academy of Sciences of Ukraine, National Academy of Sciences. K.: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. available at: <https://esu.com.ua/article-44834>.

Надійшла 24.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Гобов Денис Андрійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії, Київ, Україна; e-mail: d.gobov@kpi.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9964-0339>

Шевченко Наталя Юрївна – кандидат економічних наук, доцент, ТОВ "Технічний Університет "Метінвест Політехніка", доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень, Запоріжжя, Україна; e-mail: nataliya.shevchenko@mipolytech.education; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3085-710>

Gobov Denis – PhD (Engineering Sciences), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Computer Science and Software Engineering, Kyiv, Ukraine.

Shevchenko Natalia – PhD (Economic Sciences), Associate Professor, Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Associate Professor at the Department of Digital technologies and project-analytical solutions, Zaporizhzhia, Ukraine.

DEFINITION OF THE REQUIREMENTS ARCHITECTURE FOR IT SOLUTION AS A BUSINESS ANALYTICS PRODUCT

The **subject** of research in the article is approaches to understanding and interpreting the concept of the architecture of requirements for an IT solution. The **purpose** of the work is to define the architecture of software requirements for a better understanding and further implementation of this concept in the practice of software development. The article addresses the following **tasks**: analyze approaches to the classification of requirements to determine common and distinctive characteristics and their impact on the definition of the architecture of requirements; examine requirements engineering standards to find the definition and any relationship to the requirements architecture; consider approaches to building a set of requirements and using templates to describe them to identify optimal strategies for business analytical processes and their impact on the architecture of requirements. The following **methods** are used: comparative analysis, including comparison and generalization of different classifications of requirements taking into account their impact on the definition of requirements architecture, review of literature and standards related to requirements engineering, as well as analysis of their impact on the process of formation of requirements architecture, analysis of documentation with the aim identifying optimal strategies for building the requirements architecture, as well as analyzing the use of templates for describing requirements and their importance in defining the requirements architecture. In addition, the requirements quality criteria analysis results were interpolated to identify relationships between the quality of requirements and their architecture, which made it possible to determine the optimal approaches to building the architecture of requirements that meet the requirements of software quality. The following **results** were obtained: approaches to understanding requirements in software development were investigated, generally accepted classifications of requirements and characteristics of quality requirements were given, and links of the chain "requirements – quality of requirements – approaches to description of requirements – standards – architecture of requirements" were analyzed with further logical interpolation of the studied context on the architecture of requirements, the author's definition of the concept of architecture of requirements is proposed. **Conclusions.** Requirements architecture can be based on different architectural frameworks and depends on software development methodologies, but at the same time, it can vary depending on industry standards and the needs of a specific project. Also, requirements architecture can use certain document templates, but it is not limited to them.

Keywords: business analysis; software requirements; documentation of requirements; requirements view; requirements viewpoint; requirements architecture.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гобов Д. А., Шевченко Н. Ю. Визначення архітектури вимог до ІТ-рішення як бізнес-аналітичного продукту. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 26–38.

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.026>

Gobov, D., Shevchenko, N. (2024), "Definition of the requirements architecture for IT solution as a business analytics product", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 26–38.

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.026>

З. Дудар, С. Літвін

МЕТОД ОНТОЛОГІЧНОГО ОПИСУ В ПОБУДОВІ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНИХ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОГО НАВЧАННЯ

Предметом дослідження є аналіз та обґрунтування використання процесів програмної інженерії, основаних на онтологіях доступу до інформації та надання доступу до бази знань і їх повторного використання мовою алгебри скінченних предикатів, що є класом дескриптивних логік. Такий підхід дає змогу застосовувати переваги онтологій і логічного програмування в процесі рефакторингу розподілених систем дистанційного навчання. **Мета роботи** – створення формалізму опису взаємодії сервісів і алгоритмів побудови інтерфейсів вебсервісів для реалізації ефективної SOA-системи із застосуванням парадигми основаного на онтологіях доступу до інформації. Для досягнення поставленої мети визначено такі **завдання**: аналіз основних видів структур взаємодії SOA-сервісів; огляд реалізацій систем, що працюють із сімейством мов дескриптивної логіки, а саме алгебри скінченних предикатів; опис структури онтології, яка необхідна для роботи сервіс-орієнтованих систем, що має розмітку стандарту *Semantic Web* за допомогою рівнянь алгебри скінченних предикатів. Актуальним завданням є забезпечення організації взаємодії інтернет-ресурсів у розробленні систем розподіленого віртуального навчання, і таку взаємодію уможливило сервіс-орієнтована архітектура створення програмного забезпечення. Стаття розглядає сучасні технології *Semantic Web* та їх роль у створенні прикладних програмних систем розподілених навчальних ресурсів, побудованих за допомогою розподілених взаємодіючих сервісів. Розглянуті **методи** та матеріали: алгебра скінченних предикатів, теорія алгоритмів, об'єктно-орієнтоване проектування, теорія уніфікації. **Результати**. Отримано семантику, що дає змогу описувати SOA-системи в мовах дескриптивної логіки. Показано ефективність математичного формалізму алгебри скінченних предикатів для завдань логічного аналізу прикладних онтологій, упроваджено методи повторного використання знань і опису сервіс-орієнтованих систем. Доведено необхідність застосування алгоритмів автоматичної побудови вебінтерфейсів. **Висновки**. У роботі висвітлено переваги дослідженого рішення, а саме, алгоритми автоматизованої побудови інтерфейсів вебсервісів для SOA-архітектури, що дають змогу ефективно виконувати поставлене завдання. Алгоритми вирізняються більш загальною моделлю та швидкістю роботи й потребують оцінювання складності.

Ключові слова: програмна інженерія; сервіс-орієнтована архітектура; алгебра скінченних предикатів; онтології; алгебраїчне програмування; розподілене віртуальне навчальне середовище.

Вступ

Зростання популярності за останні роки таких технологій, як хмарні обчислення, семантичні мережі та *Semantic Web*, демонструє актуальність завдання організації взаємодії інтернет-ресурсів між собою. Забезпечити таку взаємодію дає змогу сервіс-орієнтована архітектура (SOA) розроблення програмного забезпечення. SOA-системи легко масштабуються, а їх сервісні структури полегшують повторне використання компонентів. SOA-архітектура забезпечує створення прикладних програмних систем, побудованих за допомогою розподілених взаємодіючих сервісів. Нині існує безліч систем для створення вебзастосунків із SOA-архітектурою: *Microsoft .NET*, *Oracle SOA Suite*. Однак відсутні ефективні системи, здатні автоматично будувати інтерфейси та перетворювати популярні сайти минулого покоління в елементи композитних служб або сервісних кластерів.

Як гілка символічного штучного інтелекту, подання знань та логічне виведення спрямовані на проектування програмного забезпечення систем, що інтерпретують подання світу, схоже на сприйняття людини. Системи, що належать до класу навчальних розподілених віртуальних систем, також основані на знаннях, мають обчислювальну модель предметної галузі, де символи відіграють роль артефактів реального світу, таких як фізичні об'єкти, події та відносини. Предметна галузь може охоплювати будь-яку частину реального світу або гіпотетичну систему, щодо якої є бажання подати та інтерпретувати знання для цілей проектування відповідних програмних систем.

Названі методи з використанням апарату штучного інтелекту створюють основу для побудови інтелектуальних адаптивних гіпермедійних систем та значно підвищує якість процесу інтенсифікації дистанційного навчання, відчутно збільшуючи його можливості. Ці системи підтримують модель

користувача й застосовують її для адаптації гіпермедійного простору та методів навчання до своїх потреб. Кожен користувач має свої траєкторії навчання та індивідуальні навігаційні можливості для роботи з гіпермедійним простором за допомогою SOA-архітектури навчальних ресурсів і розподілених застосунків. Необхідність алгебро-логічного опису таких систем зумовлена проблемами реалізації EAI (Enterprise Application Integration – інтеграції корпоративних застосунків) – інтеграційної архітектури, що містить набір технологій та методів для інтеграції систем і застосунків у масштабах корпоративних архітектур.

Зазначені застосунки без створення додаткових програмних рішень, як правило, не можуть взаємодіяти один з одним для обміну інформацією або за правилами бізнес-процесів (вироблення індивідуальної траєкторії навчання). Отже, з'являються проблеми з автоматизацією процесів і надлишковою інформацією, що зберігається в декількох місцях. Інтеграція програмних засобів і застосунків навчального призначення – засіб, що забезпечує процес зв'язування таких застосунків у межах однієї парадигми для одночасного їх використання з метою спрощення й автоматизації бізнес-процесів. Процес зв'язування має протікати таким чином, щоб не вносити радикальних змін у наявні застосунки або структури даних. Унаслідок цих факторів побудова SOA-системи з композитною структурою зазвичай зводиться до методів інтеграції корпоративних застосунків.

Будувати ефективну SOA-систему, позбавлену або частково позбавлену питань реалізації EAI-систем, доцільно за допомогою застосування парадигми доступу до інформації, що оснований на онтологіях (OBDA – *Ontology-Based Data Access*) – доступ до даних з допомогою високорівневого інтерфейсу онтології. Центральним процесом, що ґрунтується на онтологіях доступу до інформації, є подання бази даних мовою дескриптивної логіки (DL). Унаслідок застосування OBDA-технологій спростилася робота щодо зміни структури SOA-системи порівняно з провідними SOA-системами, зазначеними раніше. Для зміни структури SOA-системи досить відредагувати онтологію системи (що не складно для людини без фахової освіти) за допомогою редактора онтологій. У цьому разі відкривається можливість побудови інтерфейсів на базі семантичної сервіс-орієнтованої архітектури (SSOA). Використання та розвиток таких технологій

безпосередньо орієнтовані на розв'язання актуального завдання – створення розподіленого віртуального навчального середовища та компонентів, пов'язаних із повторним застосуванням знань, структурним перетворенням навчальних елементів та описом індивідуальних навчальних траєкторій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Об'єктом дослідження є SOA-системи, а також їх оптимізація за допомогою парадигми, основаної на онтологіях доступу до інформації; перетворення онтологічних описів і моделей інтелектуальних систем за допомогою алгебри скінченних предикатів, моделей, що описують алгебро-логічні перетворення навчальних матеріалів.

Далі наведено три основні структури, що характеризують SOA-системи за внутрішнім складом і способами взаємодії з обчислювальним середовищем [2, 3]:

- атомарна служба (*atomic service*) – неподільна й проста за складом;
- композитна служба (*composite service*) – батьківська, зі складною будовою, що охоплює одну або більш прості за складом дочірні служби, сховані від зовнішнього світу. Ця формація може бути подана у вигляді ієрархічної структури;
- сервісний кластер (*service cluster*) – група розподілених за призначенням і технологічно пов'язаних служб, що взаємодіють для розв'язання поставленого завдання.

Атомарні та композитні служби ефективно працюють в умовах однорідного обчислювального середовища (*Homogeneous Computing Environment*). Однорідне обчислювальне середовище належить до категорії прикладних архітектур (*Application Architecture*). Водночас композитні служби й сервісні кластери часто наявні в гетерогенних обчислювальних середовищах (*Heterogeneous Computing Environment*) під впливом завдань корпоративних архітектур (*Enterprise Architecture*). Отже, композитні служби відіграють важливу роль в обох обчислювальних середовищах.

SOA-системи легко масштабуються, а їх сервісні структури полегшують повторне використання компонентів. SOA-архітектура забезпечує створення прикладних програмних систем, побудованих за допомогою розподілених взаємодіючих сервісів [4].

Зі зростанням обсягу інформації в мережі Internet потрібно спростити доступ до інформації

вебсервісів для подальшої автоматизації процесів структурування та подання інформації. Такий інтерфейс можна забезпечити з допомогою подання знань про предметну галузь у формі онтології, доступної як інструмент технологій *Semantic Web* – перспективної галузі у сфері розвитку Internet [5]. Основне завдання *Semantic Web* – подання інформації у вигляді, придатному для машинного оброблення. Програмний агент може безпосередньо отримувати з павутини факти й виводити з них логічні висновки. Основними інструментами семантичної павутини є семантичні мережі, універсальні ідентифікатори ресурсів (*URI – Uniform Resource Identifiers*) і онтології [6]. Структура *Semantic Web* має множину мов опису, схвалених консорціумом *W3C*. Ця множина, крім іншого, містить *URI, XML, RDF, RDF-S, OWL* [7].

URI – універсальний ідентифікатор ресурсів, що зазвичай використовується для посилання на об'єкт за допомогою протоколу *HTTP* у мережі Internet. Водночас у *Semantic Web* універсальний ідентифікатор ресурсів використовується для позначення об'єктів, зокрема й об'єктів матеріального світу, таких як країни, компанії, люди та інші, або абстрактних об'єктів: назва компанії, ім'я, вік. Унаслідок того, що *URI* глобально унікальні, вони дають змогу ідентифікувати ті самі об'єкти в різних місцях середовища *Semantic Web* [8].

Структура *XML*-документа визначається за допомогою специфікації *XML Schema*. Завдяки схемі документа, сформованій цією специфікацією, можна проаналізувати будь-який *XML*-документ на правильність його структури [9].

RDF – стандарт, що описує граfi, у яких дуги й вузли містять *URI*. Формат опису *RDF*-даних має вигляд триплета "суб'єкт – відношення – об'єкт" (рис. 1). Елементами *RDF*-триплета є *URI* [10, 11].



Рис. 1. Схема формату "суб'єкт – відношення – об'єкт"

Консорціум *W3C* створив *XML*-схему для опису *RDF*-документів. Водночас для *RDF* існує аналог *XML Schema – RDF-S*.

RDF-графfi можна використовувати для роботи з онтологіями [12], описаними за допомогою *RDF-S* і *OWL*. Цей підхід забезпечить можливість

отримувати з *RDF*-документів логічні висновки. Унаслідок цього можна використовувати стандарти *Semantic Web* для взаємодії баз знань і вебсервісів.

Визначення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

За допомогою онтологій можна створювати загальні та локальні твердження. Розрізняють загальні та прикладні онтології. Загальні, або базисні, онтології містять універсальні для більшості предметних галузей поняття. Такий тип онтологій передбачає наявність базового набору термінів. Ці терміни є правилами для наступного опису більш конкретних об'єктів предметних галузей. Існують практичні реалізації технологій уніфікації онтологій, де використовуються загальні онтології [13]. Прикладні онтології містять знання про об'єкти якої-небудь конкретної предметної галузі. Такі онтології є більш модифіковані щодо загальних онтологій. Прикладні онтології оперують термінологією, властивими для певної царини термінами, що не беруть до уваги омоніми з інших предметних галузей. Прикладом омонімів може бути слово "провідник". У фізиці ця лексема вирізняється за значенням від того самого терміна транспортної галузі.

Мовою опису онтологій використовуються дескриптивні логіки (*Description Logics, DL*) [14]. Вони містять багаті виразні можливості логіки предикатів і прийнятні обчислювальні властивості: здатність розв'язання та невисоку обчислювальну складність завдань логічного аналізу.

Ці фактори забезпечують можливість застосовувати *DL* на практиці для роботи із *SOA*-системами. Дескриптивні логіки є розв'язними, але менш виразними фрагментами логіки предикатів. За синтаксисом *DL* схожі на модальні логіки. Мінімальними вимогами до виразної сили мови для побудови моделі *SOA*-системи є опис концептуальної моделі даних у базах даних і складників їх відношень.

Дескриптивні логіки створювалися для розширення семантичних мереж і фреймових структур механізмами формальної логіки. Історично *DL* називалися "термінологічні системи", але в 1980-х отримали назву "дескриптивні логіки". Вони оперують поняттями онтологій, такими як "ролі" та "концепти". В інших розділах математичної логіки термін "концепт" відповідає поняттю "одномісний предикат". Термін "роль" відповідає поняттю "двомісний предикат", або "бінарне відношення" [15].

У поняттях *DL*-структури, описаних у термінах алгебри скінченних предикатів, мають бути визначені таким чином:

- термінологія, що здатна описати предметну галузь або концептуальну модель даних, наприклад модель "сутність – зв'язок" (*Entity-Relationship, ER*), *ER*-модель даних використовується для проєктування реляційних баз даних або *Tbox* – набору термінів загального виду;

- набір тверджень про індивідів приватного виду, або *Abox*.

Отже, можна зробити взаємо однозначний перехід між аксіоматикою дескриптивних логік і аксіоматикою алгебри скінченних предикатів та її різновидів. Розглянемо кілька типів аксіом на прикладі синтаксису дескриптивної логіки *ALC*.

Формалізм для опису й аналізу концептуальної моделі *SOA*-системи на моделі алгебри скінченних предикатів, який потрібно орієнтувати на онтологічний підхід, дозволяє описувати взаємодію вебсервісів та нові алгоритми автоматизованої побудови інтерфейсів вебсервісів для *SOA*-архітектури. Такий підхід показує можливість автоматизовано будувати інтерфейси вебсервісів та використовувати весь накопичений описовий апарат алгебри скінченних предикатів як клас дескриптивних алгебр.

Отже, припустимо, *A* і *B* – деякі концепти або ролі в термінах онтологічного опису, тоді аксіома вкладеності – це вираз виду $A \subseteq B$. Цей вираз буквально означає, що концепт або роль *A* додані в концепт або роль *B*. Аксіома еквівалентності – це вираз виду $A \equiv B$, еквівалентність можна подати як дві аксіоми $A \subseteq B$ і $B \subseteq A$. Аксіома кон'юнктивності – це вираз виду $A \cap B$, що відповідає за операцію перегинання з теорії множин та повністю відповідає аксіоматиці алгебро-логічного подання задач побудови розподілених віртуальних навчальних середовищ [16].

Завданнями роботи є проведення аналізу основних видів структур взаємодії *SOA*-сервісів, огляд експериментальних реалізацій систем *OBDA*, що працюють із сімейством мов дескриптивної логіки, та опис структури онтології, що необхідна для роботи *SOA*-системи, яка має розмітку стандарту *Semantic Web* за допомогою рівнянь алгебри скінченних предикатів. Необхідним завданням є проєктування алгоритмів автоматизованої побудови інтерфейсів вебсервісів для *SOA*-архітектури в процесі розроблення та рефакторингу віртуальних

розподілених навчальних систем, що дають змогу автоматизовано будувати інтерфейси вебсервісів на основі онтології. Важливо також підтвердити практичне застосування класу дескриптивної логіки та мов вебонтологій з метою надання онтологічного доступу до інформації. Одним із завдань дослідження є обґрунтування теоретичної складності та завершуваності ухвалених рішень.

Мета роботи – створення формалізму опису взаємодії сервісів і алгоритмів побудови інтерфейсів вебсервісів для реалізації ефективної *SOA*-системи із застосуванням парадигми основанийого на онтологіях доступу до інформації. Програмна реалізація *SOA*-системи призначена для використання в основі систем автоматизованої побудови інтерфейсів взаємодії вебсервісів.

Матеріали й методи

Перевага *SOA*-технологій полягає в багаторазовому використанні програмного коду для створення складених розподілених програмних систем. Сервіс-орієнтована архітектура забезпечує кросплатформеність і незалежність від засобів розроблення, дозволяючи легко управляти створюваними програмними системами та інтегрувати їх. Наприклад, програмні реалізації компонентів *SOA*-системи, написані мовою програмування *Java*, можуть бути викликані компонентами, написаними мовою *C#* у межах однієї або декількох *SOA*-систем [2]. Основною перевагою *SOA*-архітектури є здатність до масштабованості – керування зростанням корпоративних систем, можливість надання та використання послуг у масштабах мережі Internet, здатність до скорочення витрат на організацію взаємодії систем. Нижче наведений приклад проєкту, для якого підходить *SOA*-архітектура. Великій компанії, що об'єднує менші організації, необхідно визначити, як інтегрувати придбані IT-інфраструктури у свій проєкт. Завдяки здатності до масштабування та інтеграції *SOA*-архітектура дає змогу проєктам адаптуватися до потреб конкретної предметної галузі або процесів, що відбуваються в межах цієї галузі. Інфраструктура *SOA* сприяє також більш гнучкій і оперативній роботі системи, саме тому цілісна система побудована на значній кількості парних інтерфейсів. Отже, *SOA*-архітектура забезпечує міцну основу для систем, що відповідають умовам бізнес-гнучкості й адаптивності.

Центральним поняттям *SOA*-архітектури є "сервіс" (*service* – послуга) [17]. Іменник "послуга" тлумачиться в словниках як "виконання робіт (функцій) один для одного". Однак необхідно пам'ятати, що зазначений термін поєднує такі взаємозалежні ідеї:

- можливість виконувати роботу для клієнтів;
- чітка формалізація робіт, наданих клієнтам;
- пропозиція виконати роботу для клієнта.

Сервіси є центральним поняттям *SOA*-архітектури, оскільки реалізують концепцію масштабування завдяки ефектам прозорості та легкої інтеграції. Прозорість виражається з допомогою опису сервісу, що містить відомості, необхідні для взаємодії із сервісом, і подає це в термінах "вхідні дані служб", "вихідні дані служб" і пов'язаній з ними інформації.

Опис сервісів також передає інформацію про завдання служби та умови для використання сервісу. Ключовим компонентом сервісів є чітко детерміновані інтерфейси, які можуть бути викликані стандартними способами, навіть якщо дані про застосунок, що їх викликає, не відомі сервісу. Водночас об'єктам, що взаємодіють із сервісами, не відома інформація про механізми виконання службами їх цільового завдання. Ці ефекти досягаються з допомогою інкапсуляції деталей реалізації від інших частин системи [2].

Повторне використання знань в інформаційних системах часто описується дескриптивними логічними мовами [18]. Дескриптивний підхід насамперед належить до формалізмів логіки предикатів першого порядку. Його важливість впливає з того факту, що здебільшого всі формалізми символічного подання знань можуть бути зведені до логіки предикатів першого порядку. Логіка першого порядку відтворює сутність мислення людини з допомогою терміна "логічний висновок". Вона також дає змогу вводити поняття "універсальна правильність" у тому значенні, що логічне твердження може бути правильним незалежно від будь-яких передумов. Логічний висновок та універсальна правильність можуть описуватися в термінах моделювання семантики тверджень. Модель для логічної теорії описує умови, за яких теорія правильна. Логічний висновок є твердженням, що правильне для всіх моделей теорії. Далі дедуктивне міркування пояснює, як висновок впливає з теорії. Дедукція дає доступ до знань, які неявно подані в теорії. У термінах предикатних рівнянь [19] це означає, що розв'язання рівняння щодо невідомих значень змінних чи відношень

між ними дає нам додаткові знання, не подані в явному вигляді в системі рівнянь бази знань.

Додавання рівнянь, отриманих унаслідок дедуктивного висновку з наявної бази знань, є поповненням бази знань і дає змогу повторно використати знання. Це має багато практичних переваг, зокрема: підвищення ефективності, якості та інноваційної діяльності, зменшення витрат часу й ресурсів, а також сприяння навчанню та розвитку. Проблеми повторного використання знань мають вагоме значення для різних галузей науки та практики.

Система логічних предикатних рівнянь здатна застосовувати знання предметної галузі, отримані з меншої проблеми, до більш складних проблем тієї самої або спорідненої галузі. Але наразі переважній більшості логічних та еволюційних обчислювальних методів не вистачає цієї здатності. Відсутність можливості застосувати вже набуті знання про предметну галузь призводить до споживання більшої кількості ресурсів і часу для розв'язання більш складних проблем предметної галузі. Відповідно до того, як проблема збільшується в розмірах, її стає важко, а іноді навіть непрактично (якщо не неможливо), розв'язати через нестачу ресурсів і часу. Тому необхідна система, яка має здатність повторно використовувати набуті знання про проблемну сферу для масштабування в певній галузі.

Система, основана на знаннях, підтримує базу знань, що зберігає символи обчислювальної моделі у формі тверджень щодо галузі, яка розглядається. У нашому випадку ці твердження записуються як рівняння алгебри скінчених предикатів. Така система здійснює логічні виведення з наявних рівнянь, результати яких можуть поповнювати базу знань, забезпечуючи цим повторне використання знань. Програмні застосунки можуть базувати прийняття рішень на основі запитів до бази знань.

Основна мета розроблення алгебро-логічного опису онтологічних властивостей сервіс-орієнтованих ресурсів полягає в тому, щоб створити систему, здатну автономно масштабувати навчання, починаючи від незначних питань і завершуючи складнішими проблемами тієї самої чи спорідненої сфери, у поведінці, подібній до людської. Для того, щоб автономно масштабувати проблемну сферу, необхідно вміти формувати багаторазове застосування логічних блоків знань. Для вилучення та повторного використання інформації з логічних рівнянь у проблемній сфері потрібне розширене кодування. Простір пошуку може розширитися, наприклад,

у деяких формах генетичного програмування машинного навчання.

Як правило, агент містить еволюційні обчислення та машинне навчання для вирішення певного завдання в невідомому середовищі. Правила мають форму "якщо умова, то дія". Зазвичай умова подана бітовим рядком фіксованої довжини, визначеним у потрібному алфавіті $\{0,1,\#\}$, де $\#$ – символ, що означає "невизначено", тобто або 0, або 1, а дія подана числовою константою. Техніка класифікаційної системи навчання може масштабуватися в проблемних сферах, але щоразу її потрібно вивчати із самого початку. Крім того, збільшення розмірності проблеми, що призводить до розширення простору пошуку, вимагає великого простору пам'яті та призводить до значно більшого часу навчання та зрештою обмежує систему розміром проблеми [19]. За допомогою явної передачі знань домену в системі класифікації можна досягти масштабованості, але це додає упередженості та обмежує використання в кількох доменах.

Будь-яка обчислювальна система має такі обмеження: 1) алфавіт літер, з яких будуються слова для будь-якої конкретної обчислювальної системи, завжди скінченний; 2) довжина слів, які здатна сприймати та формувати ця система, обмежена деяким кінцевим, наперед заданим числом букв, що визначається конструкцією системи, її швидкістю та терміном служби; 3) реакції обчислювальної системи чітко детерміновані: повторне подання вхідного слова завжди приводить до формування системою того самого вихідного слова.

Проблема повторного використання має три основні причини. Перша стосується розуміння контексту та застосованого рішення, інша – змісту знань, що документуються, і остання стосується всієї системи бази знань або програмного забезпечення, яке використовується для її підтримки. Коли говорять про обмін і повторне застосування знань, існує припущення, що знання є такими, які можна відтворювати та переміщувати з місця на місце; сутність, що можна отримати від людини-експерта й перенести з однієї комп'ютерної системи чи програми в іншу. Але як можна запропонувати поділитися або повторно використовувати те, що не має таких властивостей, як локальність і стійкість? Адже знання – це абстракція, яку неможливо записати й потримати в руках. Знання – це те, що спостерігач пояснив би розумному агенту,

що дає змогу агенту раціонально моделювати свою поведінку для досягнення певних цілей, які сприймаються, відповідно до того, що він дізнався від спостерігача.

Якщо припустити, що все вищезазначене виконано, то проблема ІТ-підтримки процесу управління знаннями все ще потребує вирішення. Мета поточних баз знань – сприяти обміну знаннями та повторному їх використанню. Для подання знань необхідно зважати на значну кількість факторів. Термінології, онтології та методи вирішення проблем – це декілька з них [14]. Питання полягає в тому, щоб мати змогу поділитися знаннями, які містяться в різних базах знань, оскільки всі ці фактори відрізняються від однієї бази до іншої. Несумісність систем і форматів також унеможливує об'єднання двох баз знань.

Можна виокремити чотири основні причини.

1. Неоднорідність подання. Існує кілька підходів до подання знань, але один формалізм подання не може бути безпосередньо включений в інший та не існує універсального формалізму подання знань, який би ідеально відповідав усім вимогам, і тому обмін знаннями передбачає переклад змісту однієї бази в іншу.

2. Мовні діалекти. Обмін знаннями між системами може бути дуже складним, якщо знання були закодовані різними діалектами. Є ймовірність, що це повністю змінить зміст повідомлення або його інтерпретацію.

3. Відсутність визначених правил спілкування. Теоретично окремі системи можуть комунікувати одна з одною і в такий спосіб мати користь від знань одна одної, не маючи спільної бази. Але зазвичай це неможливо, оскільки бракує узгодженого протоколу, що дозволяв би системам взаємодіяти та запитувати одна одну.

4. Невідповідності моделі на рівні знань. Навіть у разі усунення всіх перешкод проблеми з термінологією також стануть перешкодою для ефективного спілкування між різними базами. Відсутність спільного словникового запасу не дає змоги співвідносити знання однієї бази з іншою.

Отже, знання розглядається як здатність реагувати певним чином, а не як матеріальна субстанція. Навіть інформацію, що використовується для подання знань, не можна вважати такою; правила, символи та фрейми не здатні генерувати розумну поведінку. Щоб математично описати функції інтелекту, необхідно створити формальну мову,

якою можна було б здійснювати такий опис. Формальна мова має обиратися таким чином, щоб нею можна було в зручній формі записати будь-який скінченний алфавітний оператор. Такою мовою є алгебра скінченних предикатів [8].

У роботі розглядаються кон'юнктивні перетворення та відповідні формули й розширення алгебри скінченних предикатів, що відповідає кінцевій меті – побудові адекватної навчальної індивідуальної траєкторії суб'єкта навчання. Відповідь на кон'юнктивний запит $CQA(A, T, q_c)$, де q_c – кон'юнктивний запит до інформації з $Abox$ A деякої КВ, що залежить від $Tbox$ T , зводиться до завдання виконати запит до бази даних: $QE(A, q_0)$, де q_0 – запит у межах логіки предикатів, що не залежить від $Abox$ і здатний бути реалізованим у мові реляційних баз даних, наприклад SQL . Проблема цього підходу полягає в тому, що запит може суттєво розширитися. З огляду на наведений приклад подамо ER -діаграму взаємодії сервісів в SOA -системі (рис. 2).

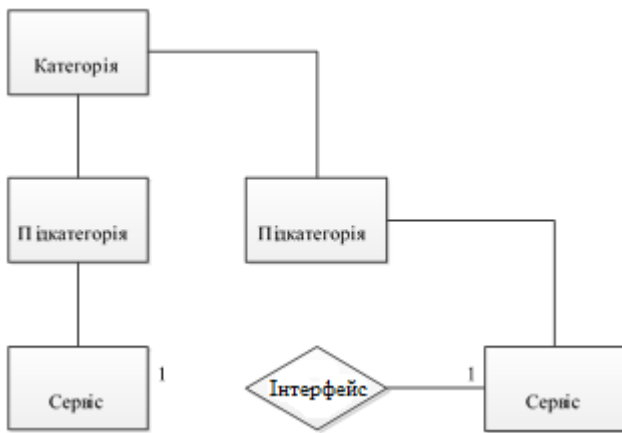


Рис. 2. Приклад ER -діаграми взаємодії вебсервісів

Розглянемо автоматизацію побудови вебінтерфейсів на основі вхідних параметрів для SOA -архітектури. Побудуємо для цього математичну формалізацію елементів сервіс-орієнтованої архітектури побудови вебінтерфейсів.

Сервіси всередині SOA -системи можуть належати до кількох категорій [2], певним розроблювачам, що, наприклад, розподіляють сервіси за територіальними й функціональними ознаками. Категорії зі свого боку можуть міститися в інших категоріях. Кожний сервіс може мати інтерфейс взаємодії з іншими сервісами. Отже, існує кілька визначень.

Визначення 1. Категоризацію композитних сервісів і сервісних кластерів можна подати у вигляді формалізації в межах теорії множин.

Якщо сервіси b_s, b_{s_1}, b_{s_2} є елементами множини B_s , певні категорії $B_s, B_{s_1}, B_{s_2}, B_{s_3}$ є множинами, що належать до універсальної множини U , інтерфейси належать множині відношень R_s , то система множин, що описує SOA -архітектуру, підпадає під певні обмеження.

Сервіс b_s має міститися в певній категорії $(b_s \in B_s)$.

Необхідно, щоб вкладення підкатегорії в категорію відповідало вимозі $B_{s_1} \subseteq B_{s_2}$.

Вкладення підкатегорії в кілька категорій має відповідати вимозі $B_{s_1} \subseteq B_{s_2} \cap B_{s_3}$.

Вкладення декількох підкатегорій в одну категорію має відповідати вимозі $B_{s_1} \cup B_{s_2} \subseteq B_{s_3}$.

Категорії мають відповідати вимозі $B_{s_1} \cup B_{s_2} = \emptyset$.

Інтерфейс має відповідати вимозі $(b_{s_1}, b_{s_2}) \in R_s$.

Тоді автоматизована побудова інтерфейсів має вигляд такої відповідності – відповідність φ є відображенням області визначення $Servis(C_s, Q_s, S_s)$ в область значень:

$$\cup ServI(c_i, q_i, s_i),$$

$$s_{SOA} \in I_{SOA},$$

де C_s, Q_s, S_s – параметри для множинного створення сервісів; I_{SOA} – елемент множини $ISOA$; $ISOA$ – множина інтерфейсів, які відповідають зазначеним параметрам.

Визначення 2. Значення для області визначення відповідності називаються вхідними параметрами із залежними умовами, якщо $x \in x'_C, x \in x'_S$, де x – деякий елемент умови запиту. В іншому разі значення для відповідності називаються вхідними параметрами без залежних умов.

Наведемо приклад для параметрів без залежних умов. Потрібно побудувати інтерфейси (Клієнт C_s , Дані Q_s , Сервер S_s), де C_s – сайт навчального порталу (*Educationportal*) міста Харків (*Khcity*). У вебсервісі C_s із вебсервісів S_s будуть відправлятися дані Q_s , що містять інформацію про номери телефонів установ (*Phone*). Вебсервіси S_s зі свого боку –

це утворювальні сайти навчальних закладів (*Education*) міста (*Khcity*).

$$C_s(x_1, x_2) \leftarrow Educationportal(x_1), Khcity(x_2);$$

$$Q_s(x_3) \leftarrow Phone(x_3);$$

$$S_s(x_4, x_5) \leftarrow Education(x_4), Area(x_5).$$

Далі наведений приклад для параметрів із залежними умовами. Запит адреси сервера та запити адреси клієнта можуть містити однакові елементи умови, такі параметри називаємо параметрами із залежними умовами.

$$C_s(x_1, x_2, x_3) \leftarrow Educationportal(x_1), Region(x_2), City(x_3);$$

$$Q_s(x_4) \leftarrow Personal(x_4);$$

$$S_s(x_5, x_3) \leftarrow Education(x_5), City(x_3).$$

Далі подана оптимізація множини *ANS* для відповідності *Servirend*. Ролі в онтологічній *SOA*-моделі використовуються для реєстрації інформації про інтерфейси, що додаються. Визначимо безліч аксіом і тверджень бази знань *K*, що містять ролі, як *Rbox*. У процесі оброблення вхідних параметрів відповідності *Servirend* інформація про ролі не потрібна. Отже, немає необхідності брати до уваги *Rbox* для реалізації подання *Servirend*.

Розглянемо інтерпретацію відповіді на запит до бази даних без урахування *Rbox*.

Нехай запит q – кон'юнктивний запит або об'єднання кон'юнктивних запитів, а база знань $DO_c = K/Rbox$, тоді відповіддю на q до DO_c

Потрібно побудувати інтерфейси (Клієнт C_s , Дані Q_s , Сервер S_s), де на всіх сайтах навчальних порталів (*Educationportal*) кожного міста (*City*) для адміністративного регіону (*Region*) подаватиметься інформація про персонал (*Personal*) з вебсервісу S_s . Вебсервіси S_s – це навчальні сайти міста (*City*), зазначеного в C_s . Залежні умови позначаються однаковими змінними елементів умови запиту. У цьому прикладі така змінна – x_3 .

є множина $servans(q, K_c)$ кортежів \bar{a} із констант, що містяться в K_c , таких, що $\bar{a}^{M_c} \in q^{M_c}$ для кожної моделі M_c у K_c .

Відсутність *Rbox* зменшує розмір *Tbox* і *Abox*, що частково вирішує проблему розширення запиту під час відповіді на *OBDA*-запит.

Результати досліджень та їх обговорення

Далі наведемо приклад опису *ER*-моделі обмеження доступу користувачів до тем або інших видів послуг вебсервісів засобами логіки (рис. 3).

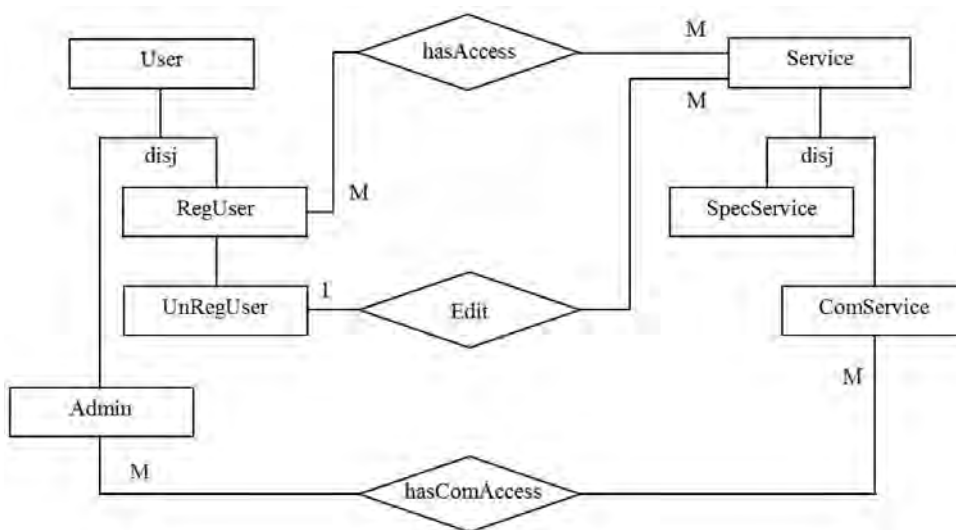


Рис. 3. ER-діаграма доступу до послуг вебсервісу

У розглянутій ER-моделі користувачі поділяються на зареєстрованих (*Reguser*) і незареєстрованих (*Unreguser*). Розрізняють послуги (*Service*) спеціальні (*Specservice*) і загальні (*Comservice*). Незареєстровані користувачі мають доступ до загальних послуг (*hascomaccess*). Зареєстровані користувачі мають доступ до всіх послуг (*hasaccess*), зокрема й до спеціальних. Зареєстрований користувач може бути адміністратором (*Admin*), що редагує (*Edit*) послугу.

Підсутності ER-моделі описуються за допомогою включення концептів.

$$\text{Reguser} \in \text{User}, \text{Unreguser} \subseteq \text{User}, \text{Admin} \subseteq \text{Reguser}, \\ \text{Comservice} \subseteq \text{Service}, \text{Specservice} \subseteq \text{Service}.$$

Аналогічно описуються підзв'язки за допомогою включення ролей:

$$\exists \text{hasComAcces} \subseteq \exists \text{hasAccess}.$$

Якщо використовувати кон'юнктивний складник модифікацій алгебро-логічного опису, то немає можливості повністю відтворити диз'юнкцію. Проте можна описати диз'юнкцію концептів і ролей з допомогою негативного включення:

$$\text{RegUser} \subseteq \neg \text{UnRegUser}, \\ \text{ComService} \subseteq \neg \text{SpecService}.$$

Для зазначення зв'язку між двома сутностями, що беруть участь у відношенні, використовуються еквівалентність ролі з концептом, що виражає першу сутність, і еквівалентність інверсії цієї ролі з концептом, що виражає другу сутність. Еквівалентність реалізується за допомогою взаємної імплікації двох сигнатур.

$$\text{UnregUser} \subseteq \exists \text{hasComAccess}, \\ \text{RegUser} \subseteq \exists \text{hasAccess}, \\ \text{Admin} \subseteq \exists \text{edit}, \\ \exists \text{hasComAccess} \subseteq \text{UnRegAccess}, \\ \exists \text{hasAccess} \subseteq \text{RegUser}, \\ \exists \text{edit} \subseteq \text{Admin}, \\ \text{Service} \subseteq \exists \text{has_Access} - , \\ \exists \text{has_Access} - \subseteq \text{Service}, \text{Service} \subseteq \exists \text{edit} - , \\ \exists \text{edit} - \subseteq \text{Service}, \\ \text{ComService} \subseteq \exists \text{hasComAccess} - , \\ \exists \text{hasComAccess} - \subseteq \text{ComService}.$$

Для створення алгоритмів логічного аналізу онтологічної SOA-системи потрібно розглянути основні алгоритмічні завдання, пов'язані з категорійним аналізом алгебри скінченних предикатів як дескриптивної логіки та парадигмою OBDA.

Перелічимо визначення цих завдань.

Крок 1 – визначення несуперечності бази знань – перевірка на існування хоча б однієї моделі в KB $K = \langle Tbox, Abox \rangle$.

Крок 2 – перевірка на існування $B^{I \subseteq C^I}$ у довільній інтерпретації I для заданого $Tbox$, де C, B – концепти або ролі, тобто з'ясування властивості "вкладеність концептів або ролей".

Крок 3 – "перевірка екземпляра класу" – перевірка на існування $a^I \in A^I$ у довільній моделі I бази знань K , де A – концепт; a – індивід. Перевірка екземпляра ролі визначається відповідно.

Крок 4 – завершальний – повернення відповіді на запити до KB.

Щоб уникнути негативних результатів роботи алгоритмів логічного аналізу, необхідно використовувати явні критерії вибору мови дескриптивної логіки для розв'язання завдань конкретної предметної галузі. Такими критеріями можуть слугувати обчислювальна складність і завершеність алгоритмів – за наявності фактора завершеності алгоритм видає результат своєї роботи через кінцевий час.

Обчислювальна складність алгоритму визначає залежність необхідного обсягу пам'яті та часу для виконання цього алгоритму від розміру вхідних даних. Це одна з основних проблем у розвитку онтологічного опису.

Дослідження оптимізації алгоритмів починається з витягу класу обчислювальної складності завдання, яке алгоритм має вирішувати. Проаналізовано класи складності, поширені у сфері розроблення алгоритмів для дескриптивної логіки:

$$\text{Logspace} \subseteq \text{Nlogspace} \subseteq P \subseteq NP \subseteq \text{exptime} \subseteq \text{Nexptime}.$$

Клас *Logspace* містить завдання, для виконання яких детермінованій машині Тюрінга буде потрібно обсяг пам'яті, що перебуває в логарифмічній залежності від вхідних значень.

Префікс N у назвах класів *Nlogspace*, NP і *Nexptime* означає, що зазначені класи містять завдання, які можуть бути розв'язані за умови витрати ресурсів, що відповідають їх класу складності з назвою без префікса на недетермінованій машині Тюрінга. Оскільки недетермінована машина Тюрінга – це лише абстрактна модель, то алгоритм цього класу навряд чи зможе бути розв'язаним на реальному комп'ютері, відповідному до детермінованої машини, за такий самий час.

Клас P містить всі ті проблеми, рішення яких детермінованою машиною Тюрінга поліноміально залежить від розміру входу.

$Exptime$ – клас, що містить завдання, які детермінована машина Тюрінга виконує за кількість часу, що перебуває в експонентній залежності від вхідних значень.

Спочатку дослідження складності висновку в дескриптивній логіці були більш зосереджені на класі P без розгляду нерозв'язаних NP проблем. Це давало гарантовану вірогідність того, що алгоритм працюватиме швидко. Однак бази знань реального розміру можуть бути оброблені за розумний термін, незважаючи на високий клас складності – $Exptime$ або вище.

Розуміння принципів зменшення складності в дескриптивних логіках дозволить не тільки обрати адекватну мову для опису вебонтології, але й використовувати ці знання в проектуванні KB.

Визначимо KB K як двійку: $K = \langle Tbox, Abox \rangle$, де $Tbox$ – множина аксіом; $Abox$ – множина тверджень. Вхідні параметри, що впливають на обчислювальну складність завдань логічного висновку: розмір $Tbox$, розмір $Abox$, розмір запиту – число параметрів запиту q .

Для завдань логічного висновку розрізняють три види обчислювальної складності:

- складність щодо даних: складність оцінюється як функція від розміру $Abox$, що використовується для мов, які спеціалізуються на більших розмірах $Abox$, а саме для завдань онтологічного доступу до БД;
- складність щодо онтології та даних: складність оцінюється як функція від розміру $Tbox$ і $Abox$. Це застосовується в тому разі, коли $Tbox$ може бути дуже великим і його розміром не можна знехтувати;
- комбінована складність: складність оцінюється як функція від розміру q , $Tbox$ і $Abox$. Це зазвичай і застосовується для алгебро-логічного подання.

Зниження обчислювальної складності алгоритмів зазвичай досягається через обмеження виразності мови. Також складність можна зменшити з допомогою винаходу алгоритмів для конкретної предметної галузі.

Швидкість виконання алгоритмів для завдань логічного висновку в технологіях дескриптивної логіки вища, ніж у структурованих алгоритмах.

Далі обґрунтовується важливість застосування алгоритмів автопобудови інтерфейсів вебсервісів. Необхідне розроблення алгоритмів для реалізації

відповідності нотаціям *Serviren* унаслідок того, що таких алгоритмів на базі дескриптивної логіки наразі не існує. Водночас структуровані алгоритми, як показано вище, не мають переваг технологій алгебраїчного програмування. Необхідно зменшити кількість породжених запитів порівняно з іншими алгоритмами логічного висновку. На відміну від стандартних алгоритмів логічного висновку, існує можливість створення алгоритму запиту до бази даних, оптимізованого під *SOA*-завдання. Цей алгоритм буде вирізнятися від інших меншим розміром породжуваних запитів до бази даних.

Для онтологічної *SOA*-системи необхідні специфічні алгоритми *CRUD* на базі дескриптивної логіки. Принцип роботи алгоритму передбачає певні етапи.

Крок 1 – перевірити зміст у запиті q інформації про ролі.

Крок 2 – переформулювати атоми кожного кон'юнктивного запиту $q \in PR'$ і отримати новий запит для кожного атома переформульованої формули. Для кожної пари атомів g_1 і g_2 , яка уніфікується та перебуває в тілі запиту q , обчислити кон'юнктивний запит $q' = reduce(q, g_1, g_2)$.

Загальна змінна – це змінна, що з'являється мінімум удвічі в тілі запиту, або константа. Водночас аргумент атома запиту називається незалежним, якщо він є нерозпізнаваною незалежною змінною. Незалежний аргумент атома позначається символом " $_$ ".

Функція *findr* видає результат "1", якщо в запиті перебувають атоми з двома аргументами, інакше результат дорівнює "0". Тут $q[g/g']$ означає кон'юнктивний запит, отриманий від q атома, що замінює g новим атомом g' . Функція τ ухвалює як вхідне значення кон'юнктивний запит q і повертає новий кон'юнктивний запит, отриманий заміною кожного входження незалежної змінної в q символом " $_$ ". Аргумент атома в запиті є залежним, якщо він відповідає розпізнаваній змінній або загальній змінній.

Функція *reduce* приймає як вхідні параметри кон'юнктивний запит q і два атоми g_1 і g_2 , що перебувають у тілі запиту q , і повертає кон'юнктивний запит q' за допомогою застосування до q уніфікатора *MGU* (*Most General Unifier*) для g_1 і g_2 . У процесі уніфікації g_1 і g_2 кожне входження

символу "_" має бути розглянуте як присутність незалежної змінної. Уніфікатор *MGU* замінює кожний символ "_" в g_1 на відповідний аргумент в g_2 , і кожний символ "_" в g_2 на відповідний аргумент в g_1 . Завдяки уніфікації, виконуваної за допомогою функції *reduce*, зв'язані змінні в q можуть стати незв'язаними в q' . Отже, позитивні включення, незастосовні до атомів q , пізніше можуть бути застосовані до атомів q' .

Доведення завершеності алгоритму. Нехай T – *Tbox* бази знань та q – кон'юнктивний запит до T . Тоді алгоритм *Rewwr*(q, T) завершується.

Процес доведення описано далі. Максимальне число атомів у тілі кон'юнктивного запиту, що генерується за допомогою поданого алгоритму, дорівнює довжині початкового запиту q . Довжина запиту менша або дорівнює n , де n – розмір запиту, тобто n пропорційний числу атомів і числу компонентів запиту.

Кількість термінів, що містять кон'юнктивні запити, які генеруються за допомогою поданого алгоритму, дорівнює кількості змінних і констант, що входять в q , плюс символ "_". Отже, кардинальність такого набору менша або дорівнює $n+1$, де n – розмір запиту.

Число різних атомів, які можуть виникнути в кон'юнктивних запитах, що генеруються за алгоритмом, менше або дорівнює $m \cdot (n+1)^2$, $m = m_1 + m_2$, де m_1 – число концептів чи ролей у запиту. Водночас m_2 – число концептів чи ролей у *Tbox* або, у разі відсутності інформації про ролі в запиту, у *Tbox/RBox*.

Алгоритм бере до уваги запити, які він згенерував. Із цього випливає, що число різних кон'юнктивних запитів, згенероване алгоритмом, скінченне. Також алгоритм не генерує запит понад один раз. Отже, алгоритм завжди завершується.

Як приклад описано процес реалізації в *SOA*-системі можливості використання *CRUD* (*Create, Read, Update, Delete*). *CRUD* – аббревіатура стандартних операцій під час роботи з інформацією: створення, перегляд, оновлення та вилучення.

Реалізацією операції "створення" є алгоритм *Sircreate*. У цьому алгоритмі, користуючись раніше розглянутими алгоритмами, необхідно отримати інформацію з *Abox* і обробити її, формуючи в цьому

разі конструкції для побудови інтерфейсів. Цей алгоритм може бути використано для операції оновлення, тому що за повторного виконання алгоритму на вже використаних параметрах необхідні дані будуть оновлені без ушкодження структури системи.

Нехай $DO = \langle T, A \rangle$ – база знань логіки, Z, Q, S – кон'юнктивні запити. Алгоритм *Sircreate* як вхідні параметри має: Z, S, Q, T, A . В алгоритмі використано функцію *Consistent*, що реалізує перевірку бази знань на несуперечність. Якщо база даних має неправильний стан (порушена умова несуперечності), тоді немає сенсу виконувати подальші дії, й алгоритм завершується.

Процедура *addrole* додає інформацію про нові інтерфейси в *Tbox T*. Процедура *addinabox* додає інформацію про нові інтерфейси в *Abox A*. Функція *dba* виконує запити в триплеті над *Abox A*, що є базою даних. Процедура *sendservices* відповідає за формування коду із запитами до бази даних для вебсервісів та його відправлення на адреси клієнтів і сервера, базуючись на відповіді *Abox SOA*-системи.

Прикладом використання алгоритмів, що розроблено в роботі, застосовано інструментальні засоби, а саме *Java* – мова програмування, яка найбільше підходить для розроблення інтелектуальної сервіс-орієнтованої системи, базуючись на мовах дескриптивної логіки (*Sir*-системи). Історично склалося так, що більшість алгоритмів логічного виведення для дескриптивних логік і інструменти для роботи із *Semantic Web* реалізовані мовою *Java*. Отже, якщо обрати мову програмування *Java* для розроблення *Sir*-системи, можна інтегрувати сторонні алгоритми, реалізовані цією мовою.

Рекомендовано редактор онтологій *Protégé*, що має великий вибір інструментів для роботи з онтологіями. Водночас *Protégé* підтримує плагіни, написані мовою *Java*. Спираючись на попередній пункт, плагінів може бути реалізовано багато. Крім того, можна забезпечити інтеграцію *Sir*-системи та редактора *Protégé* за допомогою розроблення плагіна.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Ефективність алгебри скінчених предикатів полягає в тому, що її мовою зручно записуються закони істинності та хибності, які відіграють особливу роль, оскільки задають вимоги, необхідні й достатні для коректного введення змінних ознак

на скінченних множинах. Закон істинності задає область зміни змінної, а закон хибності забезпечує попарну різницю всіх елементів множини, на якій задана змінна. Алгебра скінченних предикатів дає змогу інтерпретувати знання в строгій математичній формі, де різні ознаки та їх значення пов'язані між собою за допомогою булевих і предикатних операцій.

Для ефективного розв'язання рівнянь із невідомими скінченними предикатами доцільно спочатку дослідити рівняння, записані за допомогою операцій булевої алгебри, оскільки саме ці операції найчастіше трапляються під час запису довільних предикатних рівнянь.

Як показано в роботі, архітектура *OBDA* забезпечує ефективну роботу за умови невеликого розміру *Tbox* і значного розміру *Abox*. Водночас *Tbox* в *OBDA* є більш динамічною та масштабованою структурою порівняно з *Abox*. У процесі розроблення онтології необхідно зважати на ці фактори, розрізняючи статичні конструкції та конструкції, які будуть змінюватися та масштабуватися під час роботи системи, на *Abox* і *Tbox* системи.

У роботі алгоритму створено нові запити до баз даних. Ці запити зберігаються в текстовому форматі. Для обчислення пам'яті, яку займають результати роботи алгоритму, необхідно кількість створених запитів обчислити за формулою, ідентичною формулі розрахунку часу роботи алгоритму, з різницею в тому, що, замість функції розрахунку часу $t(x)$, використовувалася функція розрахунку кількості породжених запитів.

Отримано оригінальні алгоритми автоматизованої побудови інтерфейсів вебсервісів для *SOA*-архітектури, що дають змогу автоматизовано будувати інтерфейси вебсервісів. Алгоритми ризяться більш загальною

моделлю та швидкістю роботи, вищою за аналоги на 24–41%, залежно від вхідних параметрів алгоритмів.

Запропоновано метод опису онтологічних запитів, що вирізняється від сторонніх алгоритмів трансформації запитів більш швидкою роботою завдяки ігноруванню несуттєвих елементів вхідних показників. Різниця у швидкості роботи між отриманим алгоритмом трансформації запитів і аналогами залежить від кількості несуттєвих елементів в онтології. Доведено коректність і оцінки складності побудованих алгоритмів.

Розроблено ефективну *SOA*-систему за допомогою парадигми, основаної на онтологіях доступу до інформації. Для реалізації *SOA*-системи створено формалізм для опису процесів системи за допомогою онтології, запропоновано ефективні алгоритми та вдосконалено наявні алгоритми на основі алгебри скінченних предикатів і категорійного аналізу для роботи із *SOA*-системами.

У подальших дослідженнях необхідно докладно проаналізувати алгоритми відповідей на запит у межах технологій *OBDA* для алгебро-логічного опису й обрати ефективний алгоритм перед тим, як створювати *Sir*-системи. Для реалізації алгоритму рекомендується застосовувати мови вебонтологій *OWL* і *OWL 2*, зокрема профіль *OWL 2 QL*. Також перспективним є подання вихідних показників у вигляді запитів розроблення і використання *SqL*-подібних мов запитів. Доцільно спростувати запити, застосовуючи методи мінімізації формул алгебри скінченних предикатів та методи подання не повністю визначених предикатів для реляційних запитів.

Для безпеки зберігання бази знань рекомендується використовувати реплікацію інформації.

Список літератури

1. Sarker U., Deraman A.B., Hasan R. Descriptive Logic for Software Engineering Ontology: Aspect Software Quality Control. *4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510585>
2. Rawal R., Goel K., Gupta, C. COVID-19: Disease Pattern Study based on Semantic-Web Approach using Description Logic, *IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 2020, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298278>
3. Kamide N., Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information. *2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, Miyazaki, Japan, 2020, P. 218–223. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>
4. Shubin I. Development of conjunctive decomposition tools. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, Vol. 2870, P. 890–900. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper67.pdf>

5. Sapra D., Pimentel A. D. Deep Learning Model Reuse and Composition in Knowledge Centric Networking. *29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, Honolulu, HI, USA, 2020, P. 1–11. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCCN49398.2020.9209668>
6. Shubin I., Snisar S., Litvin S., Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems. *IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2021, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
7. Каратаєв О., Ситніков Д. Метод повторного використання знань у формі логічних рівнянь. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, No. 3(25). 2023. С. 15–26. DOI: <http://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.015>
8. Karataiev O., Sitnikov D., Sharonova N. A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations, *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*. CEUR Workshop Proceedings, 2023, P. 224–235. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
9. Sharonova N., Doroshenko A., Cherednichenko O. Issues of Fact-based Information Analysis. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)* CEUR Workshop Proceedings, 2021, Vol. 2870. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2136/10000011.pdf>
10. Zhou B., Bao J., Liu Y., Song D., BA-IKG: BiLSTM Embedded ALBERT for Industrial Knowledge Graph Generation and Reuse. *IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Warwick, United Kingdom, 2020, P. 63–69. DOI: <http://doi.org/10.1109/INDIN45582.2020.9442198>
11. He L., P. Jiang, P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse. *IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <http://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>
12. Tereshchenko G., Gruzdo I. Overview and Analysis of Existing Decisions of Determining the Meaning of Text Documents, *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Vol. 8632014, 2019, P. 645–653. DOI: <http://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632014>
13. Sharonova N., Kyrychenko I., Tereshchenko G. Application of big data methods in E-learning systems, *2021 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*, 2021. CEUR-WS, Vol. 2870. 2021, P. 1302–1311. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper96.pdf>
14. Каратаєв О., Шубін І. Проблеми повторного використання знань у процесі проєктування програмних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. No 2 (24). С. 62–71. DOI: <http://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
15. Козирев А., Шубін І. Метод планування завдань оброблення даних у розподілених системах з обмеженою інформацією про доступні ресурси. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. No. 3 (25). С. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
16. Karataiev O., Shubin I., Formal Model of Multi-Agent Architecture of a Software System Based on Knowledge Interpretation. *Radioelectronic and Computer Systems*. No 4 (108). 2023 P. 53–64. DOI: <http://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>
17. Backer P., Siemens G. Educational data mining and learning analytics. *The Cambridge handbook of the learning sciences*, 2019. 274 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/316628053_Educational_data_mining_and_learning_analytics
18. Dudar Z., Shubin I., Kozryev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021, 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20
19. Gruzdo I., Kyrychenko I., Tereshchenko G., Shandze O. Analysis of Models Usability Methods Used on Design Stage to Increase Site Optimization. *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*, Volume III: Intelligent Systems Workshop, 2023. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3403, P. 387–4093. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper31.pdf>

References

1. Sarker, U., Deraman, A. B., Hasan, R. (2018), "Descriptive Logic for Software Engineering Ontology: Aspect Software Quality Control", *4th International Conference on Computer and Information Sciences (ICCOINS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/ICCOINS.2018.8510585>
2. Rawal, R., Goel, K., Gupta, C. (2020), "COVID-19: Disease Pattern Study based on Semantic-Web Approach using Description Logic", *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 2020, P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298278>

3. Kamide, N. (2020), "Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information", *2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, Miyazaki, Japan, 2020, P. 218–223. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>
4. Shubin, I. (2023), "Development of conjunctive decomposition tools", *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2870, P. 890–900. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper67.pdf>
5. Sapra, D., Pimentel, A. D. (2020), "Deep Learning Model Reuse and Composition in Knowledge Centric Networking", *29th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, Honolulu, HI, USA, P. 1–11. DOI: 10.1109/ICCCN49398.2020.9209668
6. Shubin, I. Snisar, S., Litvin, S. (2021), "Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems", *IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
7. Karataiev, O., Sitnikov, D. (2023), "The method of reuse of knowledge in the form of logical equations", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 3(25), P. 15–26. DOI: <http://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.015>
8. Karataiev, O., Sitnikov, D., Sharonova, N. (2023), "A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations", *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*, CEUR Workshop Proceedings, 2023, P. 224–235. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
9. Sharonova, N., Doroshenko, A., Cherednichenko, O. (2021), "Issues of Fact-based Information Analysis", *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*. CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2870. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2136/10000011.pdf>
10. Zhou, B., Bao, J., Liu, Y., Song, D. (2020), "BA-IKG: BiLSTM Embedded ALBERT for Industrial Knowledge Graph Generation and Reuse", *2020 IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Warwick, United Kingdom, 2020, P. 63–69. DOI: <http://doi.org/10.1109/INDIN45582.2020.9442198>
11. He, L., Jiang, P. (2020), "P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse", *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <http://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>
12. Tereshchenko, G., Gruzdo, I. (2019), "Overview and Analysis of Existing Decisions of Determining the Meaning of Text Documents", *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T) 2019*, P. 645–653. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632014
13. Sharonova, N., Kyrychenko, I., Tereshchenko, G. (2021), "Application of big data methods in E-learning systems", *2021 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2021)*, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2870, P. 1302–1311. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper96.pdf>
14. Shubin, I., Karataiev, O. (2023), "Reuse of Information Based on The Interpretation of Knowledge", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 2 (24), P. 62–71. DOI: <http://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
15. Kozyriev, A., Shubin, I. (2023), "Method of Planning Data Processing Tasks in Distributed Systems with Limited Information About Available Resources", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 3 (25), P. 27–39. DOI: <http://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
16. Karataiev, O. Shubin, I. (2023), "Formal Model of Multi-Agent Architecture of a Software System Based on Knowledge Interpretation", *Radioelectronic and Computer Systems*. No. 4 (108), P. 53–64. DOI: <http://doi.org/10.32620/reks.2023.4.05>
17. Backer, P., Siemens, G. (2019), "Educational data mining and learning analytics", *The Cambridge handbook of the learning sciences*, 274 p. available at: https://www.researchgate.net/publication/316628053_Educational_data_mining_and_learning_analytics
18. Dudar, Z., Shubin, I., Kozyriev, A. (2021), "Individual Training Technology in Distributed Virtual University". *Lecture Notes in Networks and Systems*. 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20
19. Gruzdo, I., Kyrychenko, I., Tereshchenko, G., Shanidze, O. (2023), "Analysis of Models Usability Methods Used on Design Stage to Increase Site Optimization", *7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023)*, Volume III: Intelligent Systems Workshop, CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3403, P. 387–4093. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper31.pdf>

Відомості про авторів / About the Authors

Дудар Зоя Володимирівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, професорка кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: zoia.dudar@nure.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5728-9253>

Літвін Світлана Геннадіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірантка кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: svitlana.litvin@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7183-6345>

Dudar Zoia – Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Litvin Svitlana – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ONTOLOGICAL DESCRIPTION METHOD FOR BUILDING SERVICE-ORIENTED DISTRIBUTED LEARNING SYSTEMS

The **subject** of the research is the analysis and justification of the use of software engineering processes based on ontologies of data access and representation of access to knowledge bases and knowledge reuse in the language of algebra of finite predicates, which is a class of descriptive logics. This approach allows you to use the advantages of ontologies and logic programming in the refactoring of distributed distance learning systems. The **purpose** of the work is to create a formalism for describing the interaction of services and algorithms for building web service interfaces for the implementation of an effective SOA system using the paradigm of access to data based on ontologies. To achieve the **goal**, the following tasks were solved: an analysis of the main types of interaction structures of SOA services, an overview of implementations of systems working with a family of descriptive logic languages, namely, algebra of finite predicates, and a description of the structure of the ontology necessary for the operation of service-oriented systems, which has the markup of the Semantic Web standard using finite predicate algebra equations. The **task** is an urgent task of ensuring the organization of interaction of Internet resources in the development of distributed virtual learning systems, and such interaction is enabled by the service-oriented architecture of software development. The article examines modern technologies of the Semantic Web and their role in ensuring the creation of applied software systems of distributed learning resources built using distributed interactive services. The considered **methods** and materials include methods of algebra of finite predicates, theory of algorithms, object-oriented design, theory of unification. **The results.** The semantics of the SOA system is obtained, which makes it possible to describe SOA systems in the languages of descriptive logic. The effectiveness of the mathematical formalism of the algebra of finite predicates for the tasks of logical analysis of applied ontologies, the use of knowledge reuse methods, and the description of service-oriented systems is shown. The necessity of using algorithms for automatic construction of web interfaces is shown. **The conclusions** of the work highlight the advantages of the researched solution, namely, algorithms for the automated construction of web service interfaces for SOA architecture, which make it possible to automatically build web service interfaces. Algorithms differ in a more general model and speed of work and require an assessment of complexity.

Keywords: software engineering; service-oriented architecture; algebra of finite predicates; ontologies; algebraic programming; distributed virtual learning environment.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Дудар З. В., Літвін С. Г. Метод онтологічного опису в побудові сервіс-орієнтованих систем розподіленого навчання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.039>

Dudar, Z., Litvin, S. (2024), "Ontological description method for building service-oriented distributed learning systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 39–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.039>

О. ЖУРИЛО, О. ЛЯШЕНКО

АРХІТЕКТУРА ТА СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ *IoT* НА ОСНОВІ ТУМАННИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Предметом дослідження в статті є архітектура безпеки Інтернету речей (*IoT*) на основі туманних обчислень, які надають ефективні та безпечні послуги для багатьох користувачів *IoT*. **Метою роботи** є дослідження архітектури безпеки для систем Інтернету речей на основі туманних обчислень. Для досягнення поставленої мети в статті було виконано такі **завдання**: описано концепцію туманних обчислень, розглянуто їх архітектуру та зроблено порівняльний аналіз архітектур туманних і хмарних обчислень; окреслено принципи проєктування та реалізації архітектури системи туманних обчислень; досліджено багаторівневі заходи безпеки на основі туманних обчислень та описано сфери використання мереж Інтернету речей на основі туманних обчислень. Для вирішення перелічених завдань упроваджено такі **методи дослідження**: теоретичний аналіз літературних джерел; порівняння архітектури хмарних обчислень з архітектурою туманних обчислень; абстрагування та узагальнення для визначення принципів проєктування та реалізації архітектури безпеки Інтернету речей. Здобуто такі **результати**: розглянуто архітектуру туманних обчислень і порівняно її з хмарною архітектурою; сформульовано принципи проєктування та реалізації архітектури систем туманних обчислень; запропоновано багаторівневі заходи безпеки *IoT* на основі туманних обчислень. **Висновки**. Дослідження системи безпеки *IoT* на основі туманних обчислень мають важливе теоретичне значення. Архітектура туманних обчислень, на відміну від хмарної, краще задовільняє попит на високий трафік і низьку затримку мобільних застосунків, надаючи більше переваг для систем, що потребують оброблення інформації в режимі реального часу. У проєктуванні та реалізації архітектури систем туманних обчислень необхідно зважати на фактори обсягу пам'яті, затримки та корисності для ефективної інтеграції туманних технологій з *IoT*. Для забезпечення високого рівня захищеності систем важливо впроваджувати багаторівневі заходи безпеки, використовуючи як програмні, так і апаратні рішення.

Ключові слова: хмара; туманні обчислення; архітектура; Інтернет речей; безпека *IoT*.

Вступ

Інтернет речей дедалі більше перетворюється на основний чинник проривних змін у сфері інформаційних технологій. З постійним розвитком *IoT* кількість його користувачів поступово збільшується, а обсяг передачі даних стрімко зростає, що призводить до перевантаження хмарного сервера. Класична парадигма централізованих хмарних обчислень стикається з низкою проблем, таких як висока затримка, низька пропускна спроможність і збої в роботі мережі.

Як нова модель обчислень, туманні обчислення пропонують новий спосіб зменшити навантаження на хмарні сервери. Туман забезпечує оброблення та збереження інформації *IoT* локально на пристроях *IoT* замість того, щоб відправляти їх у хмару. На відміну від хмари, туман надає послуги зі швидшим відгуком і вищою якістю. Тому туманні обчислення можна вважати найкращим вибором для того, щоб дозволити Інтернету речей надавати ефективні та безпечні послуги для багатьох користувачів *IoT*. Однак раціональне використання

ресурсів туманного вузла все ще залишається складним і ключовим моментом.

Дослідження безпеки *IoT* на основі туманних обчислень було розглянуто в роботах [1, 2], де автори запропонували систему управління ресурсами на основі політики в туманних обчисленнях, розширюючи поточну платформу туманних обчислень для підтримки безпечної співпраці та сумісності між ресурсами, запитуваними різними користувачами в туманних обчисленнях. У роботі [3] запропоновано механізм, який використовує туманні обчислення для покращення розподілу інформації про відкликання сертифікатів у пристроях *IoT* з метою покращення безпеки. У статті [4] подано ефективну централізовану архітектуру безпеки для наскрізної інтеграції систем охорони здоров'я на основі *IoT*, розгорнутих у хмарних середовищах. У роботах [5, 6] проаналізовано архітектуру туманних обчислень і вказано на пов'язані з цим потенційні проблеми безпеки та довіри, а також окреслено основні проблеми, виклики та напрямки майбутніх досліджень бізнес-процесів, що підтримують туманні обчислення у послугах *IoT*.

У попередніх студіях ми робили огляд рішень з апаратної безпеки кінцевих пристроїв туманних обчислень в *IoT*. У роботі [7] наведено, що апаратні компоненти будь-якої системи, особливо системи Інтернету речей, пов'язані з туманними обчисленнями, не схильні до кібератак, зломів, вторгнень, маніпуляцій та вільні від них. Оскільки застосування розглянутих апаратних засобів безпеки може допомогти зберегти конфіденційність, цілісність і доступність інформації, що циркулює в мережі, та підвищити загальну стійкість системи до можливих атак, необхідно детальніше розглянути питання побудови архітектури безпеки Інтернету речей на основі туманних обчислень.

Отже, метою роботи є дослідження побудови архітектури безпеки для систем Інтернету речей на основі туманних обчислень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: розглянути архітектуру туманних обчислень та порівняти її з архітектурою

хмарних обчислень; окреслити принципи проєктування та реалізації архітектури системи туманних обчислень та дослідити багаторівневі заходи безпеки на основі туманних обчислень.

Архітектура системи туманних обчислень

Якщо порівнювати тришарову архітектуру системи хмарних обчислень (рівень кінцевого користувача хмарних обчислень, мережний рівень і хмарний рівень) з архітектурою туманних обчислень, то другу систему можна розподілити на п'ять шарів: рівень кінцевого користувача, рівень мережі доступу, туманний рівень, основний мережний рівень і хмарний рівень, відповідно, як показано на рис. 1.

Неважко помітити, що ближче до нижнього рівня, то більша зона поширення і менша затримка передачі даних кінцевого користувача на цей рівень [8]. У табл. 1 наведено основне обладнання та найважливіші функції зазначених п'яти рівнів.

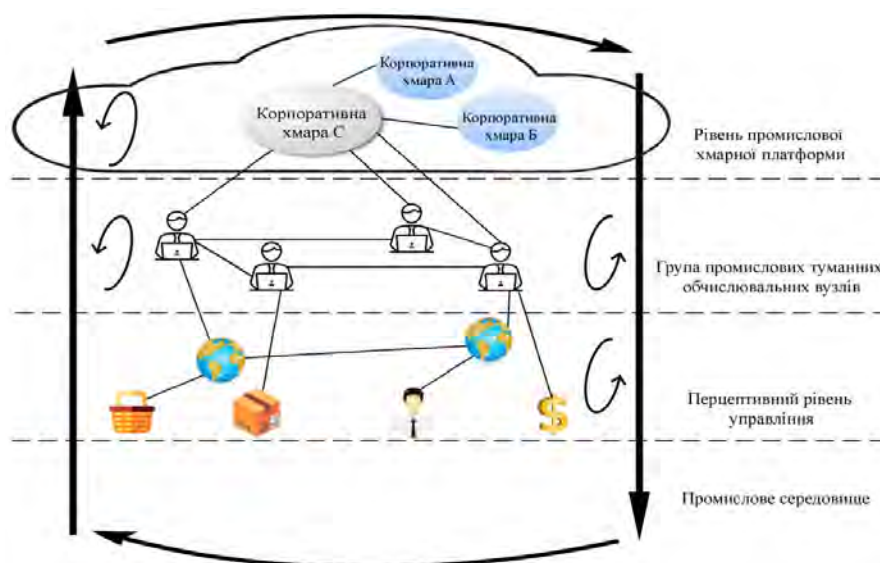


Рис. 1. Системна архітектура туманних обчислень

Таблиця 1. Системна архітектура туманних обчислень

Рівень	Основне обладнання	Основна функція
Рівень кінцевого користувача	Термінальні пристрої та сенсорні вузли мобільних телефонів користувачів, портативних комп'ютерів тощо	Термінальні пристрої та сенсорні вузли мобільних телефонів, портативних комп'ютерів тощо
Рівень мережного доступу	Бездротове мережне обладнання є основою, яку доповнює дротове мережне обладнання	Надсилати завдання кінцевого користувача на відповідний вузол туману за заздалегідь визначеним правилом
Туманний рівень	Туманний периферійний вузол, мікротуман, туманний сервер	Забезпечити певний рівень обчислень, зберігання та зв'язку
Основний мережний рівень	Основне мережне обладнання	Надсилайте завдання, що виходять за межі обчислення шару туману або смості зберігання, до хмарного центру оброблення даних
Хмарний рівень	Сервер хмарного дата-центру	Резервне копіювання даних, оброблення великих обчислювальних завдань

У запропонованій концепції туманних обчислень завдяки розширенню туманного шару з можливостями обчислень і зберігання між хмарним сервером і термінальним пристроєм ключові дані та обчислювальні сервіси, необхідні для локалізації на хмарному сервері, переміщуються на туманний сервер, розташований ближче до термінального пристрою. Забезпечуючи кешування даних, локалізовані обчислення та інші функції, можна краще задовільнити попит на високий трафік і низьку затримку мобільних застосунків.

Основними елементами рівня кінцевого користувача зазвичай є мобільний телефон, портативний комп'ютер та інші термінальні пристрої. Із розвитком технології сенсорних мереж сенсорний вузол також відіграватиме важливу роль на цьому рівні. Ними можуть бути розміщені десь стаціонарні пристрої, наприклад датчики на світлофорах по обидва боки дороги або мобільні термінали, зокрема мобільні телефони й ноутбуки користувачів. На цьому рівні ці пристрої є генераторами і користувачами контенту. На зазначеному рівні генеруються завдання, а оброблені результати повертаються на цей самий рівень. Крім того, термінальний пристрій також має виявити та вказати туманний вузол, що відповідає переадресації завдання [9].

Проектування та реалізація архітектури системи туманних обчислень

Розглянувши різні реалізації архітектури, зауважимо: щодо реалізації *CISCO* пропонує фреймворк *IOx*, де користувачі можуть розробляти застосунки для розгортання [10]. Для незначних туманних застосунків була реалізована невелика універсальна платформа туманних обчислень з використанням *Raspberry Pi* [11]. Реалізовано конфігурацію термінального пристрою, центру хмарних обчислень та мережного каналу, а алгоритм планування та управління ресурсами туманних обчислень може бути реалізований у різних сценаріях відповідно до реальних потреб. Крім того, продуктивність усього алгоритму проектування може базуватися на затримці та енергоспоживанні, зайнятості мережних ресурсів та витратах на управління, а також на інших показниках для вимірювання. Хоча це відкриває нові можливості для дослідників алгоритмів планування, його функціональність не дуже висока; усе ще існують

деякі відмінності між ефектами технології моделювання та фактичними результатами.

Під час туманних обчислень запускається віртуальна машина (ВМ) або завдання, завантажене в контейнер [12]. Для досягнення ефективного використання ресурсів фізичної машини, віртуальні машини або контейнери мігрують між фізичними машинами. Місцерозташування такої міграції ВМ або контейнера залежить від конструкції алгоритму планування. Розроблення алгоритму планування є більш складним, ніж у хмарних обчисленнях. З одного боку, туманні обчислення дуже чутливі до часу, отже, буде точно враховано час перебування користувача на туманному вузлі, час міграції завдання в різні туманні вузли й час, коли туманний вузол пересилає завдання до хмарного дата-центру. З іншого боку, туманний вузол установлює не тільки обчислювальні вузли, але також і вузли, пов'язані зі сховищем. Аналогічно, спосіб розміщення цих вузлів певною мірою впливає на якість відповідних послуг. Підсумовуючи, зауважимо, що в процесі розроблення алгоритму планування необхідно враховувати певні фактори.

1. *Обсяг пам'яті.* Однією з основних функцій шару туману є зберігання. Для розрахунку задачі необхідна вихідна інформація розкидається по кожному вузлу туману. Вимога до сховища полягає в тому, щоб мати змогу максимально наблизити дані до потреб користувача, але водночас вимагати, щоб простір для зберігання застосовувався якомога менше. У зв'язку з цим час збору інформації став найважливішим показником оцінки. Місцерозташування даних може бути використано безпосередньо для отримання часу їх відгуку. Але ці проблеми можна скоригувати, обмеживши кількість резервних копій даних. Тому для вимірювання ситуації зі зберіганням інформації також використовуватимуться ці два показники.

2. *Затримка.* На додаток до зберігання цієї функції, туманний вузол також приймає на себе функцію, обчислену в шарі туману, і однією з найважливіших метрик обчислювальної потужності є затримка. Порівняно з хмарними обчисленнями, обчислювальну задачу туманних обчислень можна виконувати безпосередньо на туманному вузлі, не завантажуючи її спочатку в хмарний центр оброблення даних, а потім на вузол, що дає змогу ефективно зменшити затримку. Час проходження в обидва кінці – це найточніший спосіб визначити загальний час, необхідний для повернення результату

від початку виконання задачі термінальним пристроєм до термінального пристрою вивантаження. Хоча одна й та сама задача інтуїтивно зрозуміла та зручна для горизонтального порівняння, метод повністю ігнорує різницю між обсягом інформації, яку задача має передати, і обсягом обчислень задачі. Хоча кількість виконаних інструкцій вимірюється в одиницях часу, причиною специфічної для користувача реалізації може бути неможливість впоратися з програмою за умови постійного використання процесора. Тому цей метод вимірювання має проблеми з вимірюванням затримки обчислень. На сьогодні метод розрахунку затримки є більш обґрунтованим, ніж порушення угоди про рівень обслуговування (*SLA – Service Level Agreement*), що робить вимірювання дефіциту ресурсів більш

обґрунтованим [13]. У разі порушення *SLA*, ступінь дефіциту визначається як:

$$SLA\ violation = \frac{\sum_{i=1}^m \int (r_i(t) - a_i(t)) dt}{\sum_{i=1}^m \int r_i(t) dt}, \quad (1)$$

де m – кількість задач, t – кількість ресурсів, яку запитує t -та задача в t -й момент часу, а $a_i(t)$ – кількість ресурсів, що фактично виділяються i -й задачі в t -й момент часу. Як видно з рівняння, що вищий ступінь зайнятості ресурсів, то більшим стає ступінь затримки. За певних умов між ними існує лінійна залежність. У зв'язку з цим маємо такий доказ. Припускаючи, що кожне завдання є незалежним одне від одного, запитувана кількість ресурсу становить μ_i середнє X_i , а виділена кількість ресурсу $X_i + \varepsilon_i$, тоді очікувана величина дефіциту ресурсу в межах *SLA* буде такою:

$$E[SLA] = \sum_{i=1}^m E \left[\int \left(1 - \frac{a_i(t)}{r_i(t)} \right) dt \right] = \sum_{i=1}^m \int E \left[1 - \frac{a_i(t)}{r_i(t)} \right] dt = \sum_{i=1}^m \int \left(1 - \frac{E[X_i] + E[\varepsilon_i]}{E[X_i]} \right) dt = - \sum_{i=1}^m \frac{E[\varepsilon_i]}{\mu_i} dt. \quad (2)$$

Очікуване значення кількості інструкцій, які згенерували затримку через недостатність ресурсів, становить:

$$\sum_{i=1}^m \int E[X_i - (X_i + \varepsilon_i)] dt = - \sum_{i=1}^m \mu_i \int \frac{E[\varepsilon_i]}{\mu_i} dt. \quad (3)$$

Видно, що існує пропорційна залежність між очікуваним значенням ступеня дефіциту ресурсів та очікуваним значенням кількості команд затримки, а кількість команд затримки також пропорційна часу затримки. Отже, можна зробити висновок, що існує пропорційна залежність між очікуваним значенням рівня дефіциту ресурсів і часом затримки.

Неважко помітити, що цей метод вимірювання не тільки ігнорує вартість затримки диференційних послуг у мережі, але й не відображає нелінійну вартість затримки. Тому необхідні подальші дослідження та вдосконалення визначення вартості затримки.

Енергоспоживання також є важливим показником обчислювальної потужності. Коли виконання завдань, як правило, завантажується на віртуальну машину, кілька віртуальних машин на одному пристрої спільно використовують ресурси пристрою, що може значно підвищити ефективність використання ресурсів. На рис. 2 показано параметри енергоспоживання деяких серверів.

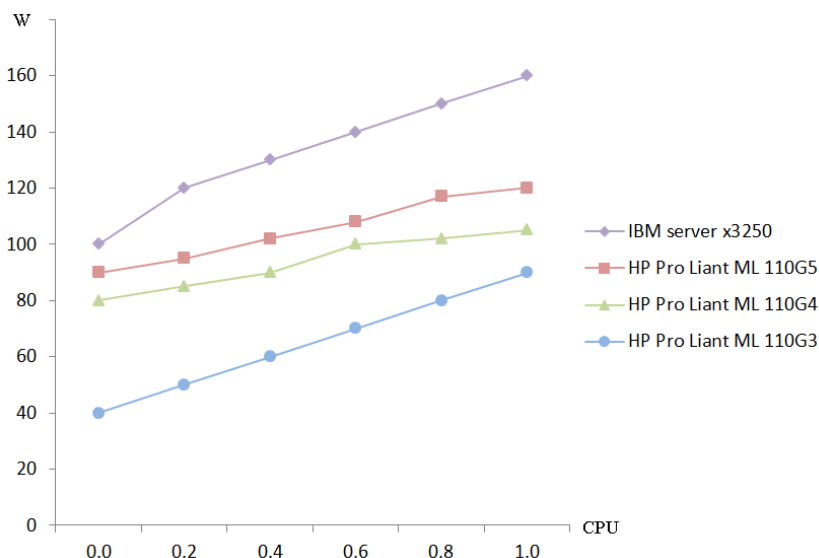


Рис. 2. Параметри енергоспоживання

Як видно з рис. 2, існує лінійна залежність між енергоспоживанням пристрою та використанням ресурсів процесора, до того ж найменше енергії споживає *IBM serverx3250*, а найбільше – *HP ProLiant ML110G3*. Отже, моделювання енергоспоживання можна визначити таким чином:

$$p = \int \sum_{i=1}^m \left[p_{idle_i} + (p_{max_i} - p_{idle_i}) \frac{a_i(t)}{c_i} \right] dt, \quad (4)$$

де m – загальна кількість серверів; p_{idle_i} та p_{max_i} – енергоспоживання першого сервера в режимі очікування та енергоспоживання за умови повного завантаження відповідно; $a_i(t)$ та c_i – відповідно кількість ресурсів і ресурсів, зайнятих сервером. З рис. 2 також видно, що енергоспоживання, коли завантаженість процесора дорівнює 0, набагато більше, ніж енергоспоживання в режимі сну.

Тому люди планують встановлювати якомога менше віртуальних машин на якомога меншій кількості пристроїв, але що більший ступінь встановлення, то вищий ризик нестачі ресурсів, і ризик затримки зростає. Тому уніфікований розгляд обчислювальних потужностей, як правило, поєднує два показники: енергоспоживання та затримку. Крім того, існують подібні показники, такі як викиди CO₂, пропорційні споживанню ресурсів, що можуть мати такий самий ефект.

Корисність. Туманні обчислення мають таку саму комерційну цінність, як і хмарні обчислення. Більшість поточних розгортань туманних обчислень мають конкретні сценарії застосування, переважно приватний туман. Однак із зростанням популярності туманних обчислень завдання, завантажені на приватний туманний вузол, можуть бути не в змозі задовольнити їх власні потреби. Люди можуть орендувати туманні вузли, як орендують хмарні сервери. Наприклад, під час використання обчислювальних потужностей, що надаються навколишніми датчиками і розумними датчиками по обидва боки дороги в Інтернеті транспортних засобів, виникає проблема ціноутворення.

Проблема управління та планування ресурсів туманних обчислень є ключовою для впливу на продуктивність послуг туманних обчислень. Особливо в разі великомасштабних запитів на обслуговування, якщо проблема планування ресурсів не буде ефективно вирішена, це збільшить затримку обслуговування та зменшить використання ресурсів. Тому оптимальна мета може бути досягнута

завдяки поглибленому вивченню питань управління ресурсами туманних обчислень та планування. Існує декілька реалізацій (фреймворків) хмарних обчислень на основі агентів з удосконаленням наявного фреймворку туманних обчислень. Крім того, існує також схема інтелектуального розподілу ресурсів на основі популярності сервісу (*SPSRP – service popularity-based smart resources partitioning*), яка дає змогу застосовувати *IoT* для туманних обчислень [14].

Багаторівневі заходи безпеки на основі туманних обчислень

Логічно розподілити *IoT* на три основні рівні: рівень сприйняття, транспортний рівень і рівень оброблення. Крім того, застосування інформації, сформованої на рівні оброблення, також можна розглядати як прикладний рівень. Кожен логічний рівень охоплюється базовою архітектурою безпеки *IoT*. Сторона сенсорного рівня та транспортного рівня, близькі до рівня зондування, здебільшого розподіляються за допомогою туманного обчислювального рівня, як показано на рис. 3.

Розглянуто та запропоновано різні заходи безпеки для апаратного рівня та рівня вбудованих пристроїв під шаром туманних обчислень для захисту від проблем безпеки, з якими система *IoT* має зіткнутися знизу [15]. Наприклад, щоб забезпечити відстеження та цілісність даних, необхідно використовувати функцію антикловування датчика на фізичному рівні; щоб поліпшити управління надійністю, необхідна функція фізичного неклонування та лічильники продуктивності апаратного забезпечення; щоб поліпшити конфіденційність і захист приватності, необхідно застосовувати легковаговий алгоритм шифрування. На додаток до вищезазначених елементів захисту існують різні алгоритми, такі як алгоритми шифрування, хеш-функції та алгоритми обміну ключами, що можуть бути використані для паролічних елементів захисту безпеки *IoT*. Використання різних криптографічних алгоритмів і вибір оброблення інформації в різних місцях оброблення може суттєво вплинути на споживання енергії. Тому, щоб не споживати занадто багато енергії, необхідно обрати певне місце оброблення і криптографічний алгоритм відповідно до обсягу інформації.



Рис. 3. Відносне положення туманного обчислювального шару в системі Інтернету речей

Наприклад, у межах датчика він може обробляти дані розміром до 1 КБ; якщо обсяг інформації у межах 1 МБ, то як місце оброблення можна використовувати вузол туману; якщо дані в межах 1 ГБ або перевищують 1 ГБ, вони мають оброблятися на шлюзі або в об'єднаній інфраструктурі вищого рівня. Щоб скоротити час відгуку системи, необхідно повністю локалізувати інформацію, що значно підвищить ефективність системи *IoT*. Потужні мікроконтролери роблять систему інтелектуальних датчиків на чипі все більш досконалою. Наприклад, флеш-мікроконтролер виробництва *AD* має вбудовану програмну флеш-пам'ять обсягом 64 КБ і флеш-пам'ять даних 4 КБ, 2304 байти оперативної пам'яті даних і значну кількість периферійних пристроїв, таких як 12-розрядний АЦП/ЦАП (аналого-цифровий перетворювач / цифро-аналоговий перетворювач),

лічильник часових інтервалів, сторожовий таймер тощо. Ядро 8052 використовується з тактовою частотою до 20 МГц. Такого рівня системи на кристалі достатньо для підтримки легких криптографічних операцій. Оскільки для управління сенсорною мережею в *IoT* зазвичай використовується 16/32-розрядний удосконалений *RISC*-процесор зі скороченим машинним набором інструкцій + вбудована архітектура *Linux* у поєднанні з повною підтримкою потужності та апаратного забезпечення, він повністю здатний забезпечити більш високий рівень захисту шифрування, робота якого здебільшого еквівалентна персональному комп'ютеру. Зарубіжні дослідники провели ґрунтовне вивчення, узагальнили наявні елементи шифрування різних рівнів *IoT* за результатами досліджень і склали відносно надійну рекомендацію (див. табл. 2).

Таблиця 2. Елементи шифрування кожного рівня Інтернету речей

	Датчик	Вузол	Шлюз	Спільна архітектура
Додавання та розшифрування	PRESENT	CLEFIA	ASE	RSA
Алгоритм	mCRYPTON	AES	ECC	
Хеш-функція	DM-PRESENT	PROP	HMAC	SHA-3
Алгоритм обміну ключами	DH-512	DH-512	ECDH	DH
Цифровий підпис	ECDSA-163	ECDSA-233	DSA	ECDSA-409

Щоб побудувати архітектуру безпеки *IoT* на основі рівня туманних обчислень, перше питання полягає у виборі правильної апаратної конфігурації туманних обчислень. Необхідно знайти відповідні заходи безпеки й розгорнути місце для створення та перевірки відповідного методу шифрування. Використовуючи новий рівень туманних обчислень для тестування наявного полегшеного методу шифрування на предмет затримки та

енергоспоживання, можна покращити коефіцієнт безпеки, удосконаливши наявний простий метод шифрування або перейшовши на більш надійний алгоритм безпеки, щоб відповідати вищезазначеним вимогам. Після цього варто прагнути оптимізувати базову архітектуру системи *IoT*, а також консолідувати та зміцнити основу системи *IoT* способом зменшення обчислювальних затримок, викликаних використанням заходів безпеки,

без зниження показників безпеки та збільшення енергоспоживання. Для того, щоб побудувати систему безпеки *IoT* на основі туманних обчислень, необхідно повністю застосовувати всі види ресурсів, що вводяться на рівні туманних обчислень. На основі дотримання наявних заходів безпеки досягається максимальна інтенсивність безпеки.

Згідно з показниками коефіцієнт безпеки традиційних датчиків недостатньо високий, оскільки вони генерують лише відповідні цифрові результати вимірювань щодо об'єктивної кількості, зібраної ними самими, а потім безпосередньо шифрують і завантажують результати. Тепер є спосіб підвищити коефіцієнт безпеки датчика, який полягає в тому, щоб спробувати витягти унікальний ідентифікатор кожного датчика, а потім модифікувати відповідний алгоритм безпеки в датчику, щоб унікальний ідентифікатор датчика також використовувався для обчислення шифрування. Ці параметри значно покращать безпеку вихідної інформації.

Через обмеженість різних ресурсів на терміналах *IoT* легковагові алгоритми безпеки все ще залишаються найбільш широко використовуваними методами для терміналів *IoT*. Якщо *IoT*-термінал може надати більше обчислювальної потужності та простору завдяки туманним обчисленням, він має достатньо можливостей для підтримки алгоритмів безпеки з вищим ступенем захисту і складнішими обчисленнями. Отже, *IoT*-термінали можуть значно підвищити свою обчислювальну потужність і продуктивність безпеки. Однак для того, щоб реалізувати цю ідею, необхідно належним чином удосконалити та впровадити алгоритм безпеки на основі повного дослідження, зрозуміти наявні легковагові алгоритми безпеки, прискорити роботу, підвищити рівень безпеки та знизити енергоспоживання.

Вимірювання ресурсозабезпеченості туманних вузлів

Рівень туманних обчислень – це не просто сукупність туманних вузлів, оскільки кілька вузлів можуть утворювати кластер для досягнення ефективної інтеграції ресурсів. Для того щоб зрозуміти максимальний ресурсний потенціал, який може забезпечити шар туманних обчислень, необхідно сформувати відносно стабільний алгоритм оцінювання ресурсів вузла за допомогою відповідного стрес-тестування, що також має

забезпечити реальний інструмент для майбутнього планування мережі *IoT*.

Ефект покращення алгоритму безпеки може бути вимірний багатьма різними показниками, такими як тривалість обчислювального часу пристрою, енергоспоживання та сила захисту від атак. У процесі постійної корекції та безперервного тестування алгоритмів безпеки дослідження вищезгаданих датчиків, вузлів, шлюзів і спільної архітектури для розшифрування матимуть значну користь в удосконаленні алгоритмів безпеки. Зі стрімким розвитком технологій Інтернету та Інтернету речей генерується значний обсяг даних і виникає питання, як використовувати великі дані швидко, безпечно та ефективно. Покращення можуть бути досягнуті завдяки оптимізації апаратних алгоритмів, таких як датчики, удосконалення алгоритмів безпеки, вимірювання ресурсозабезпеченості вузлів туману та вимірювання ступеня вдосконалення алгоритмів безпеки для досягнення рівня безпеки обчислення туману. Крім того, деякі вчені запропонували схему реагування на запити безпеки з підтримкою розрахунку туману для *IoE* (*Internet of Energy*), яка використовує консенсус і шифрування контролю доступу для запобігання атак змови [14].

Застосування туманних обчислень

Архітектура туманних обчислень може мати безліч функцій і компонентів. Вона містить шлюз туманних обчислень для отримання даних, зібраних із пристроїв *IoT*, а також може містити різноманітні дротові та бездротові кінцеві точки збору даних, зокрема надійні маршрутизатори та інші комутаційні пристрої. В інших аспектах вона може також містити клієнтський пристрій і шлюз для доступу до периферійного вузла. Крім того, архітектури туманних обчислень вищого рівня охоплюватимуть опорні мережі та маршрутизатори, а в кінцевому підсумку – глобальні хмарні сервіси й серверні системи. Група з розроблення еталонної архітектури *Open Fog Alliance* запропонувала три мети для розвитку фреймворку туманних обчислень. Туманне середовище є горизонтально масштабованим. Це означає, що воно підтримуватиме вертикальні застосунки в різних галузях; воно може забезпечити злагоджену роботу від хмари до об'єкта; це технологія системного рівня, яка поступово розвиватиметься від об'єктів і границь мережі.

Туманні обчислення можуть використовуватись у різноманітних технологіях: Інтернеті речей, розумних будинках і містах, інтелектуальному водінні, програмно-визначених мережах, Тактильному Інтернеті (*Tactile Internet*) [16] та ін.

На прикладі інтелектуального водіння туманні обчислення можуть виконати обчислювальну задачу з високими вимогами до часу. Нижче наводимо приклад застосування туманних обчислень в інтелектуальному водінні.

Запроваджена модель інтелектуального водіння показана на рис. 4. У традиційному режимі водіння інформація про місцезнаходження автомобіля надходить із супутника крізь датчик глобальної системи позиціонування (*GPS – global positioning system*), і інформація надсилається до хмарного дата-центру навігаційного програмного забезпечення. Після того, як центр оброблення даних збирає дані, вони ретельно розраховуються для отримання

навігаційної інформації та її надсилання на транспортний засіб крізь мережу. Через обмеження затримки та безпеки мережі інформація, отримана таким методом, є відносно великою, може лише приблизно показувати шляхи руху дорогами, якими проїжджає транспортний засіб, і не може виконувати дії прискорення, уповільнення та уникнення транспортного засобу в режимі реального часу, так що безпілотне водіння не може бути досягнуте за таких умов. Порівняно з традиційним режимом водіння, інтелектуальне водіння може отримувати інформацію про ситуацію на дорозі в реальному часі за допомогою сенсорних пристроїв, таких як камера та ультразвук, тим самим забезпечуючи більш безпечне керування транспортним засобом без водія. Ключовою проблемою, яку необхідно вирішити в цих сценаріях, є необхідність швидко передавати, обробляти й перевіряти зібрану інформацію.



Рис. 4. Модель інтелектуального водіння

У конкретному застосуванні туманних обчислень вузьким місцем затримки, ймовірно, є мережна передача та оброблення завдань. У туманних обчисленнях мережна передача здебільшого містить мережі від користувачів до туманних вузлів, між туманними вузлами і від туманних вузлів до хмарних центрів оброблення даних. Оскільки туманний вузол має відповідати за оброблення завдань, чутливих до затримок, якість передачі бездротової мережі доступу кінцевого користувача до туманного вузла є особливо важливою. В інтелектуальному водінні навігаційна

інформація транспортного засобу не вимагає затримки і тому може оброблятися віддаленим хмарним центром оброблення даних. Однак, щоб уникнути зіткнення з іншими транспортними засобами та пішоходами під час руху, існує висока потреба в уповільненні, і аварія може статися із незначною затримкою. Тому збір і оброблення даних мають виконуватися в приземному туманному вузлі. Однак швидкість передачі та якість сигналу сучасних бездротових мереж поки що не можуть задовольнити такі вимоги.

Для розрахунків атомізації в таких застосунках, як інтелектуальне водіння, що надзвичайно чутливе до часової затримки, можна буде використовувати технологію 5G, оскільки швидкість передачі інформації в ній удесятеро вища, ніж 4G. Тому важливим напрямом досліджень надалі є поєднання туманних обчислень із технологією 5G. У процесі оброблення завдань узагальнюється наявний алгоритм розподілу ресурсів, щоб дозволити постачальнику послуг туманних обчислень виконати завдання більш ефективно. Через обмеженість обчислювальних потужностей самого транспортного засобу завдання може бути перенесено для виконання на туманний вузол за межами транспортного засобу. Як міграція віртуальної машини, так і міграція контейнера вимагають переміщення значної кількості інформації, що призводить до неприйнятних затримок. Сучасні дослідження технології віртуалізації для туманних обчислень усе ще перебувають на початковій стадії. Крім того, оскільки туманні обчислення повинні мати справу з реальним мережним середовищем, зміни в ній є більш серйозними та мають певний час і простір. Це потрібно вирішувати за допомогою адаптивного алгоритму, і передбачати розподіл не рекомендується. Поточний адаптивний алгоритм здебільшого реалізується алгоритмом навчання з підкріпленням, але для досягнення адаптивного ефекту метод має споживати велику кількість обчислювальних ресурсів. Тому його застосовність в туманних обчисленнях є сумнівною. Крім того, оскільки положення транспортного засобу сильно змінюється з часом за умови інтелектуального водіння, ця зміна також може призвести до додаткових затримок передачі інформації. Отже, питання, як використовувати ефективний і недорогий алгоритм адаптивного планування з метою вибору відповідного вузла атомізації для міграції та як дозволити користувачам інформації отримувати інформацію якомога швидше, є одне з нагальних, що необхідно вирішити.

Оскільки вузли туманних датчиків найчастіше розгортаються на відкритому просторі інтелектуального водіння, якщо злочинці викрадуть інформацію або вона буде підроблена, це призведе до катастрофічних наслідків [17]. Наприклад, якщо задній автомобіль прийняв рішення підготуватися до обгону, але передній автомобіль не отримав інформацію вчасно або повідомлення про помилку надійшло, але він не зміг вчасно її уникнути, це,

швидше за все, призведе до дорожньо-транспортної пригоди. Тому ключовим моментом у цій технології є забезпечення цілісності та доступності повідомлення. Хоча в сучасній літературі проаналізовано можливу агресивну поведінку в туманних обчисленнях, затримка і стійкість запропонованого рішення в конкретних застосунках не були протестовані. Тому ефективні алгоритми шифрування та верифікації в туманних обчисленнях також будуть в центрі уваги подальших досліджень.

Сучасне промислове виробництво здебільшого основане на хмарних обчисленнях. Однак на практиці виявилось, що затримки хмарних серверів занадто великі, і багато дрібних операцій не можуть бути виконані вчасно (наприклад, різання мікрокомпонентів). Крім того, обсяг інформації, що збирають базові підприємства, збільшується, а основа підприємства також піддається тестуванню. Демонстраційний застосунок промислового Інтернету зображений на рис. 4. Для вирішення цих проблем із чутливими до затримок застосунками та вилученням функцій великих даних, організації можуть розгортати обчислювальні пристрої та пристрої зберігання між кінцевими пристроями і хмарними центрами оброблення даних на рівні туманного шару. Крім вимог до часової затримки та безпеки, це також ставить більш високі вимоги до єдності платформи та синергії між хмарами [18]. По-перше, оскільки базові компоненти, задіяні в промисловому виробничому середовищі, є більш складними, необхідно створити єдину платформу управління для ефективного охоплення та під'єднання хмарної архітектури, що дає змогу збирати інформацію та контролювати ці компоненти [19]. Водночас реалізована програмно-визначена група туманних вузлів, що ефективно охоплює та з'єднує хмарну платформу, гетерогенну мережу й великомасштабне термінальне обладнання, а також формує стандартний інтерфейс *API* та специфікацію з можливістю злиття хмарних технологій [20]. Однак поточні дослідження уніфікованих інтерфейсів усе ще перебувають на початковій стадії. Проте студій щодо кількості та місця розгортання контролерів усе ще недостатньо для управління такими ресурсами, як мережа, сховище та обчислювальні потужності. Це все питання, які необхідно вирішити в майбутньому. По-друге, крім застосунків, чутливих до затримок, туманні вузли в промислових виробничих середовищах вимагають попереднього вилучення функцій для оброблення інформації,

що передається в хмарний центр оброблення даних [21]. Щоб зменшити навантаження на магістраль підприємства, використовуються ключові технології хмарної конвергенції [22]. У цій технології необхідно вивчити, які завдання туманний шар подаватиме в хмарний дата-центр, статус подачі в хмарний дата-центр, який сервер подається в хмарний дата-центр, через який маршрут подачі та інші ключові питання.

Висновки

Інтернет речей стає невід'ємною частиною нашого життя. Він має здатність з'єднувати майже все з усім іншим у нашому оточенні. Пристрої Інтернету речей динамічні за своєю природою та мають обмежені можливості зберігання та оброблення інформації. Однак традиційна централізована хмара має чимало проблем, зокрема висока затримка та збої в роботі мережі. Для їх вирішення були розроблені туманні обчислення.

Мета туманних обчислень в *IoT* – підвищити ефективність, продуктивність і зменшити обсяг інформації, що передаються в хмару для оброблення, аналізу та зберігання. Отже, дані, зібрані датчиками, надсилатимуться на приграничні пристрої мережі для оброблення та тимчасового зберігання замість того, щоб відправляти їх у хмару, що дасть змогу зменшити мережний трафік і затримки. Туманні обчислення все ще перебувають на ранніх стадіях офіційного розгортання, але різні прикладні сценарії вважаються ідеальними для застосунків туманних обчислень. Інтеграція туманних обчислень з *IoT* надасть чимало переваг для різних застосунків *IoT*.

Нижче описано розвиток комбінації туманних обчислень та Інтернету речей у кількох сферах.

1. Підключені автомобілі. Поява напівавтоматичних і безпілотних транспортних засобів приведе до того, що все більше й більше інформації буде генеруватися транспортним засобом. Самостійне керування автомобілем потребує здатності аналізувати певні дані на місці, такі як довкілля, умови руху та його напрямок. Інша інформація може знадобитися для відправлення назад виробникові, щоб допомогти

поліпшити обслуговування автомобіля або відстежити його використання. Туманне обчислювальне середовище підтримує зв'язок між усіма цими джерелами інформації на периферії (транспортний засіб) і зв'язок із терміналом (виробник).

2. Розумне місто та розумні мережі. Подібно до підключених автомобілів, енергосистеми все частіше використовують інформацію в режимі реального часу для більш ефективної роботи системи. Іноді ця інформація міститься у віддалених районах, і якщо ви хочете її обробити, потрібно перебувати близько до місця, де вона була згенерована. В інших випадках інформацію із значної кількості датчиків потрібно звести воедино. Щоб вирішити обидві проблеми одночасно, можна розробити архітектуру туманних обчислень.

3. Аналіз у реальному часі. Від виробничих систем, що реагують на події, до фінансових установ, які використовують дані в реальному часі для прийняття рішень щодо транзакцій або моніторингу шахрайства, – значна кількість прикладних сценаріїв вимагає аналізу в реальному часі. Розгортання туманних обчислень допомагає передавати інформацію між місцем створення даних і місцем їх виконання.

У цій статті подано архітектуру систем туманних обчислень, описано принципи проектування та реалізації архітектури цих систем, розглянуто й запропоновано багаторівневі заходи безпеки та визначено сфери, ефективність яких можна покращити за допомогою використання туманних технологій.

Дослідження системи безпеки *IoT* на основі туманних обчислень має важливе теоретичне значення. Водночас воно має дуже широкі перспективи застосування у сфері відстеження та цілісності даних системи *IoT*, автентифікації особистості, управління довірою, конфіденційності та захисту приватного життя, а також має дуже важливе інженерне значення. Удосконалення системи безпеки *IoT* може завоювати більше довіри користувачів до системи *IoT* і має велике значення для розвитку та просування самого *IoT*.

Отже, наші подальші дослідження будуть і надалі зосереджені на інтеграції туманних обчислень з *IoT* для підвищення рівня безпеки систем Інтернету речей.

Список літератури

1. Kartheek D., Bhushan Bharath Security Issues in Fog Computing for Internet of Things. *Security Issues in Fog Computing for Internet of Things*. 2020. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0194-8.ch003>

2. Atlam H., Walters R., Wills G. Fog computing and the Internet of Things: a review. *Big Data Cogn Comput* Vol. 2(2):10.2018. DOI: <https://www.mdpi.com/2504-2289/2/2/10>
3. Alrawais A., Alhothaily A., Hu C. Fog computing for the Internet of Things: security and privacy issues. *IEEE Internet Comput* 2017. Vol.21(2). P. 34–42. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7867732>
4. Thota C., Sundarasekar R., Manogaran G. Centralized fog computing security platform for IoT and cloud in healthcare system. *Fog computing: breakthroughs in research and practice*, 2018. P. 365–378. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5649-7.ch018>
5. Zhang P.Y., Zhou M.C., Fortino G. Security and trust issues in fog computing: a survey. *Future Generation Computer Systems*. 2018. Vol. 88. P. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.008>
6. Wen Z., Yang R., Garraghan P. Fog orchestration for Internet of Things services". *IEEE Internet Computing*, 2018. Vol.21(2). P. 16–24. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7867735>
7. Журило О.Д., Ляшенко О.С., Аветісова К.А. Огляд рішень з апаратної безпеки кінцевих пристроїв туманних обчислень у Інтернеті речей. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.005>
8. Liu F., Liu Y., Jin D., Jia X., & Wang T. Research on workshop-based positioning technology based on internet of things in big data background", *Complexity Problems Handled by Big Data Technology*. 2018. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7875460>
9. S. Shen, L. Huang, H. Zhou, S. Yu, E. Fan and Q. Cao. Multistage Signaling Game-Based Optimal Detection Strategies for Suppressing Malware Diffusion in Fog-Cloud-Based IoT Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2, 2018. P. 1043–1054. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8264678>
10. Mulfari D., Celesti A., & Villari M. A computer system architecture providing a user-friendly man machine interface for accessing assistive technology in cloud computing". *Journal of Systems and Software*. 2015. P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.10.035>
11. Wang D., Fan J., Fu H., & Zhang B. Research on optimization of big data construction engineering quality management based on RNN-LSTM, *Complexity Problems Handled by Big Data Technology*. 2018. P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9691868>
12. Sharma P. K., Chen M. Y., & Park J. H. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT", *IEEE Access*, 6. 2017. P. 115–124. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8053750>
13. Massonet P., Deru L., Achour A., Dupont S., Croisez L. M., Levin A., & Villari M. Security in lightweight network function virtualisation for federated cloud and IoT. *2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. 2017. P. 148–154. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8114476>
14. Li G., Wu J., Li J., Wang K., & Ye T. Service popularity-based smart resources partitioning for fog computing-enabled industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14. 2018. P. 4702–4711. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8377998>
15. Aimin Y., Shanshan L., Honglei L., & Donghao J. Edge extraction of mineralogical phase based on fractal theory. *Chaos, Solitons & Fractals*, 117. 2018. P. 215–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.09.028>
16. R. Yaroshevych, V. Tkachov, A. Kovalenko and D. Rosinskyi Modelling the Domain Architecture of the Tactile Internet Using a Foggy Infrastructure. *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2022. P. 512–516. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238653
17. Dutta J., & Roy S. IoT-fog-cloud based architecture for smart city: Prototype of a smart building. *2017 7th international conference on cloud computing, data science & engineering-confluence*. 2017. P. 237–242. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7943156>
18. Peralta G., Iglesias-Urkia M., Barcelo M., Gomez R., Moran A., & Bilbao J. Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0", *2017 IEEE international workshop of electronics, control, measurement, signals and their application to mechatronics (ECMSM)*. 2017. P. 1–6. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7945879>
19. Fu H., Li Z., Liu Z., & Wang Z. Research on big data digging of hot topics about recycled water use on micro-blog based on particle swarm optimization", *Sustainability*, Vol. 10. 2018. 2488 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10072488>
20. Ong S.P., Cholia S., Jain A., Brafman M., Gunter D., Ceder G., & Persson K. A. The Materials Application Programming Interface (API): A simple, flexible and efficient API for materials data based on REpresentational State Transfer (REST) principles", *Computational Materials Science*, 97. 2015. P. 209–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.10.037>
21. Goldstein S. W. Information processing using a population of data acquisition devices *U.S. Patent No. 10,045,321*. 2018. URL: <https://patents.google.com/patent/US20160309312A1/en>
22. Son J., & Buyya R. A taxonomy of software-defined networking (SDN)-enabled cloud computing", *ACM computing surveys (CSUR)*, 51. 2018. P. 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3190617>

References

1. Kartheek, D., Bhushan, Bharath. (2020), "Security Issues in Fog Computing for Internet of Things", *Security Issues in Fog Computing for Internet of Things*. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0194-8.ch003>
2. Atlam, H., Walters, R., Wills, G. (2018), "Fog computing and the Internet of Things: a review". *Big Data Cogn Comput*. Vol. 2(2): 10. DOI: <https://www.mdpi.com/2504-2289/2/2/10>
3. Alrawais, A., Alhothaily, A., Hu, C. (2017), "Fog computing for the Internet of Things: security and privacy issues". *IEEE Internet Comput* 21(2), P. 34–42. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7867732>
4. Thota, C., Sundarasekar, R., Manogaran, G. (2018), "Centralized fog computing security platform for IoT and cloud in healthcare system". *Fog computing: breakthroughs in research and practice*, P. 365–378. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5649-7.ch018>
5. Zhang, P.Y., Zhou, M.C., Fortino, G. (2018), "Security and trust issues in fog computing: a survey". *Future Generation Computer Systems*, 88, P. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.008>
6. Wen, Z., Yang, R., Garraghan, P. (2018), "Fog orchestration for Internet of Things services". *IEEE Internet Computing*, 21(2), P. 16–24. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7867735>
7. Oleh, Zhurylo, Oleksii, Liashenko, Karyna, Avetisova. (2023), "Hardware security overview of fog computing end devices in the internet of things", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.005>
8. Liu, F., Liu, Y., Jin, D., Jia, X., & Wang, T. (2018), "Research on workshop-based positioning technology based on internet of things in big data background", *Complexity Problems Handled by Big Data Technology*. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/7875460>
9. S. Shen, L. Huang, H. Zhou, S. Yu, E. Fan and Q. Cao. (2018), "Multistage Signaling Game-Based Optimal Detection Strategies for Suppressing Malware Diffusion in Fog-Cloud-Based IoT Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, 2, P. 1043–1054. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8264678>
10. Mulfari, D., Celesti, A., & Villari, M. (2015), "A computer system architecture providing a user-friendly man machine interface for accessing assistive technology in cloud computing". *Journal of Systems and Software*, P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.10.035>
11. Wang, D., Fan, J., Fu, H., & Zhang, B. (2018), "Research on optimization of big data construction engineering quality management based on RNN-LSTM", *Complexity Problems Handled by Big Data Technology*. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9691868>
12. Sharma, P. K., Chen, M. Y., & Park, J. H. (2017), "A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT", *IEEE Access*, 6, P. 115–124. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8053750>
13. Massonet, P., Deru, L., Achour, A., Dupont, S., Croisez, L. M., Levin, A., & Villari, M. (2017), "Security in lightweight network function virtualisation for federated cloud and IoT", *2017 IEEE 5th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. P. 148–154. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8114476>
14. Li, G., Wu, J., Li, J., Wang, K., & Ye, T. (2018), "Service popularity-based smart resources partitioning for fog computing-enabled industrial Internet of Things", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14, P. 4702–4711. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8377998>
15. Aimin, Y., Shanshan, L., Honglei, L., & Donghao, J. (2018), "Edge extraction of mineralogical phase based on fractal theory", *Chaos, Solitons & Fractals*, 117. P. 215–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.09.028>
16. R. Yaroshevych, V. Tkachov, A. Kovalenko and D. Rosinskyi (2022), "Modelling the Domain Architecture of the Tactile Internet Using a Foggy Infrastructure," *2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. P. 512–516. DOI: 10.1109/PICST57299.2022.10238653
17. Dutta, J., & Roy, S. (2017), "IoT-fog-cloud based architecture for smart city: Prototype of a smart building". *2017 7th international conference on cloud computing, data science & engineering-confluenc*. P. 237–242. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7943156>
18. Peralta, G., Iglesias-Urkia, M., Barcelo, M., Gomez, R., Moran, A., & Bilbao, J. (2017), "Fog computing based efficient IoT scheme for the Industry 4.0", *2017 IEEE international workshop of electronics, control, measurement, signals and their application to mechatronics (ECMSM)*. P. 1–6. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7945879>
19. Fu, H., Li, Z., Liu, Z., & Wang, Z. (2018), "Research on big data digging of hot topics about recycled water use on micro-blog based on particle swarm optimization", *Sustainability*, 10. 2488 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10072488>
20. Ong, S. P., Cholia, S., Jain, A., Brafman, M., Gunter, D., Ceder, G., & Persson, K. A. (2015), "The Materials Application Programming Interface (API): A simple, flexible and efficient API for materials data based on REpresentational State Transfer (REST) principles", *Computational Materials Science*, 97, P. 209–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.10.037>

23. Goldstein, S. W. (2018), Information processing using a population of data acquisition devices *U.S. Patent No. 10,045,321*. available at: <https://patents.google.com/patent/US20160309312A1/en>
21. Son, J., & Buyya, R. (2018), "A taxonomy of software-defined networking (SDN)-enabled cloud computing". *ACM computing surveys (CSUR)*, 51. P. 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3190617>

Надійшла 14.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Журило Олег Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій, асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleh.zhurylo@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7505-2022>

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

Zhurylo Oleh – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student at the Department of Information Technology Security, Assistant Lecturer at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Liashenko Oleksii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

ARCHITECTURE AND IOT SECURITY SYSTEMS BASED ON FOG COMPUTING

The subject of the study is the security architecture of the Internet of Things (IoT) based on fog computing, which allows providing efficient and secure services for many IoT users. The **goal** is to investigate the security architecture for IoT systems based on fog computing. To achieve the goal, the following **tasks** were solved: the concept of fog computing is proposed, its architecture is considered and a comparative analysis of fog and cloud computing architectures is made; the principles of designing and implementing the architecture of a fog computing system are outlined; multi-level security measures based on fog computing are investigated; and the areas of use of fog computing-based Internet of Things networks are described. When performing the tasks, such research **methods** were used as: theoretical analysis of literature sources; analysis of the principles of designing and implementing the security architecture of the Internet of Things; analysis of security measures at different levels of the architecture. The following **results** were obtained: the architecture of fog computing is considered and compared with the cloud architecture; the principles of designing and implementing the architecture of fog computing systems are formulated; multi-level IoT security measures based on fog computing are proposed. **Conclusions:** research on IoT security systems based on fog computing has important theoretical implications. The fog computing architecture, in contrast to the cloud architecture, better meets the demand for high traffic and low latency of mobile applications, providing more advantages for systems that require real-time information processing. When designing and implementing the architecture of fog computing systems, the factors of memory capacity, latency, and utility should be taken into account to effectively integrate fog technologies with IoT. To ensure a high level of system security, multi-level security measures should be implemented using both software and hardware solutions.

Keywords: cloud; fog computing; architecture; Internet of Things; IoT security.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Журило О. Д., Ляшенко О. С. Архітектура та системи безпеки IoT на основі туманних обчислень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.054>

Zhurylo, O., Liashenko, O. (2024), "Architecture and iot security systems based on fog computing", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.054>

І. ЗАМРІЙ, І. ШАХМАТОВ

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ВЕБЗАСТОСУНКІВ З ДОПОМОГОЮ ІННОВАЦІЙНИХ ПАТЕРНІВ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Зважаючи на сучасні виклики в забезпеченні безпеки цифрових операцій, особливо у сферах електронної комерції та фінансових транзакцій, предметом вивчення є розроблення спеціалізованої програмної бібліотеки, спрямованої на підвищення безпеки вебзастосунків. Мета дослідження полягає в розробленні програмної бібліотеки, що застосовує методи штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу й підвищення рівня безпеки фінансових транзакцій. Використання цих передових технологій сприяє автоматизації виявлення потенційно шахрайських або ризикованих транзакцій, забезпечуючи цим більш високий рівень захисту користувачів. У статті вирішуються такі завдання: аналіз сучасних методів оброблення фінансових транзакцій та ідентифікації можливих загроз безпеці; розроблення UML-схеми класів бібліотеки з оброблення та аналізу фінансових транзакцій; тестування та валідація створеної моделі штучного інтелекту для оцінювання безпеки фінансових транзакцій на реальних фінансових даних. Визначено та застосовано методи машинного навчання за допомогою бібліотеки *scikit-learn* в *Python*, алгоритми якої здатні аналізувати великі обсяги інформації та виявляти потенційні ризики з високою точністю, що забезпечує ефективну інтеграцію технологій штучного інтелекту. У роботі досягнуто такі результати: визначено критерії оцінювання ризикованості фінансових транзакцій для ідентифікації потенційних ризиків; описано алгоритм роботи програми, що передбачає процедури визначення та класифікації ризиків транзакцій; запропоновано псевдокод, який ілюструє структуру класів і методів моделі, відкриваючи можливості для її адаптації та масштабування; розроблено методи генерації тестових даних, що відтворюють реалістичні сценарії фінансових транзакцій; проаналізовано результати для оцінювання ефективності розробленої моделі. Висновки. Результати дослідження та тестування дають змогу оцінити реакцію моделі на різноманітні дані та її ефективність у реальних умовах, оскільки в роботі наведено приклади оброблення різних типів транзакцій. Крім того, у дослідженні подано не лише розроблення та валідацію запропонованої моделі, але й перспективи її використання в більших масштабах, інтеграції з наявними вебзастосунками.

Ключові слова: штучний інтелект; безпека вебзастосунків; фінансові транзакції; машинне навчання; аналіз даних; виявлення шахрайства; *scikit-learn*.

Вступ

Завдяки стрімкому розвитку цифрових технологій, що проникають у кожен вимір нашого існування, забезпечення безпеки вебзастосунків та цифрових транзакцій стає першочерговим завданням. Цей процес супроводжується не тільки технологічними інноваціями, але й зростанням викликів, пов'язаних із захистом конфіденційної інформації та фінансових інтересів користувачів у цифровому просторі. Збільшення обсягів онлайн-операцій та їх різноманітності супроводжується зростанням випадків шахрайства та спроб проникнення в конфіденційні фінансові дані користувачів. Це вимагає від розробників створення ефективних інструментів для оцінювання та мінімізації ризиків у цифровому середовищі.

Сучасний стан цифрової економіки потребує не лише впровадження новітніх технологічних рішень, але й розроблення комплексних підходів до

безпеки. Інтеграція методів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання відкриває нові перспективи в боротьбі з кіберзагрозами, особливо в контексті їх розпізнавання та запобігання шахрайським діям в онлайн-транзакціях. Це дослідження спрямоване на створення інноваційного рішення, здатного ефективно виявляти порушення та запобігати потенційним загрозам у фінансовій сфері цифрових послуг.

Метою статті є розроблення ефективного інструменту, а саме програмної бібліотеки, для забезпечення безпеки фінансових даних, а також демонстрації значення технологій штучного інтелекту в розвитку цифрової економіки, наголошуючи на їх практичній значущості та потенціалі для вдосконалення повсякденного життя.

Проект оснований на використанні бібліотеки *scikit-learn* для *Python*, що є визнаною та широко застосовуваною в галузі машинного навчання. Це забезпечує інтеграцію перевірених і надійних

алгоритмів *AI* в розроблювану бібліотеку, що гарантує її ефективність та надійність.

Робота спрямована на аналіз викликів у сфері безпеки фінансових транзакцій та демонстрацію, як упровадження інноваційних технологій машинного навчання може сприяти розв'язанню окреслених проблем. Розглядаються не лише технічні аспекти розроблення та імплементації моделі, але і її потенційне застосування в різних секторах, таких як електронна комерція, банківські послуги тощо, де безпека транзакцій є вирішальною.

Дослідження має на меті не лише запропонувати ефективний інструмент для захисту фінансових даних, а й зробити внесок у розвиток технологій штучного інтелекту, з огляду на їх практичну значущість і вплив на повсякденне життя.

Аналіз проблеми й наявних методів

Кіберфізична безпека в мережах Інтернету речей (*IoT*) стрімко розвивається, особливо з упровадженням технологій, таких як блокчейн та штучний інтелект (*AI*). Наголошується на важливості взаємної автентифікації між пристроями *IoT*, яка є основним елементом у підвищенні безпеки. Інтеграція блокчейну сприяє надійності валідації сесійних ключів, що є важливим для забезпечення цілісності інформації та зниження ризику несанкційного доступу. Також використання алгоритмів *AI* сприяє адаптивності систем до різноманітних атак, підвищуючи рівень безпеки *IoT*-екосистем. У сфері *IoT* важливою є не тільки імплементація наявних рішень безпеки, але й розроблення нових методів, особливо зважаючи на широкий спектр застосування – від сільського господарства до охорони здоров'я та технологій розумних будинків [1]. Це вимагає комплексного підходу, що поєднує традиційні механізми безпеки з інноваційними рішеннями, зокрема патернами інтеграції *AI*. Такі розробки відіграють важливу роль у виявленні та запобіганні потенційних загроз, а також у просуванні напрямів майбутніх досліджень у цій сфері.

Інтеграція *AI*, блокчейну та програмно-визначеної мережі (*SDN*) відіграє ключову роль у підвищенні безпеки кіберфізичних систем [2], особливо в контексті *IoT*. Це особливо актуально з огляду на сучасні виклики, такі як сумісність, енергоефективність та надійність безпеки в мережах

IoT. У такому разі увага приділяється механізму автентифікації на основі довіри, що є ефективним для пристроїв *IoT* з обмеженими ресурсами. Такі інновації в безпеці *IoT* надихають на подальші дослідження у сфері впровадження *AI* для підвищення безпеки вебзастосунків [3].

Трансформаційний вплив *AI* на сферу кібербезпеки є надзвичайно значущим, особливо в контексті захисних стратегій. Інтеграція *AI* в заходи кібербезпеки не лише змінює підходи нападників, але й радикально підвищує ефективність оборонних механізмів. Цей процес передбачає аналіз і адаптацію до нових загроз, що постійно еволюціонують у кіберпросторі. Важливість *AI* полягає в його двозначному характері: з одного боку, він підвищує ефективність і масштабованість захисних механізмів, з іншого – відкриває нові можливості для кібератак. Особливо важливим є розуміння ролі *AI* в прогнозуванні загроз та протидії кібератакам, що зазнають постійних змін та ускладнень. Цей аспект є критичним у контексті підвищення безпеки вебзастосунків, де інноваційні патерни інтеграції *AI* можуть значно підсилити захисні можливості. Використання *AI* дає змогу не лише виявляти та нейтралізувати потенційні загрози, але й адаптуватися до постійно змінних тактик і методів нападників [4].

Вивчення впливу методів *AI* на кібербезпеку відкриває широкі перспективи для зміцнення захисту в сучасному кіберпросторі. Різноманітність методик *AI*, від розподілених до компактних, забезпечує гнучкість у виявленні, детектуванні та протидії кібератакам. Ці методи варіюються від складних алгоритмів машинного навчання до простіших, але ефективних рішень для конкретних викликів безпеки. Класифікація цих технік дає змогу глибше зрозуміти потенціал та обмеження *AI* у сфері кібербезпеки, а також визначити найбільш ефективні підходи для різних сценаріїв використання. Інноваційні патерни інтеграції *AI* у вебзастосунки можуть істотно підсилити здатність системи адаптуватися та реагувати на нові види кіберзагроз. Це передбачає розроблення та впровадження алгоритмів *AI*, здатних аналізувати та вчасно відповідати на підозрілі дії, що значно підвищує рівень безпеки вебзастосунків. Така інтеграція [5] є кроком вперед у захисті від кібератак, що постійно еволюціонують, та пропонує новітні рішення для підвищення рівня безпеки в цифровому світі.

Виявлення кібератак у середовищі *IoT* вимагає застосування складних і ефективних методів, серед яких *AI* відіграє ключову роль. Систематичний огляд літератури виявляє, що техніки глибокого навчання та машинного навчання, такі як методи класифікації та аналізу інформації, зокрема машини опорних векторів (алгоритми, що аналізують дані для класифікації та регресійного аналізу) та випадкові ліси (ансамблеві методи для класифікації, регресії та інших завдань, що працюють шляхом створення множини рішень дерев під час навчання), є особливо ефективними у виявленні та відповіді на кіберзагрози в *IoT*. Ці методи демонструють високу точність та ефективне використання ресурсів, що є критично важливим для розроблення інтелектуальних систем виявлення вторгнень. Подібні висновки є особливо релевантними для розроблення інноваційних патернів інтеграції *AI* у вебзастосунки, де безпека є ключовим пріоритетом. Інтеграція цих методів у вебзастосунки дає змогу створити більш стійкі та адаптивні системи, здатні виявляти загрози та протистояти різноманітним формам кібератак. Особлива увага до розроблення розумних архітектурних рамок для систем інтелектуального виявлення вторгнень [6] наголошує на потребі постійно вдосконалювати методи виявлення загроз, зокрема ті, що стосуються вебзастосунків.

Глибокий аналіз методів *AI*, що використовуються для підвищення безпеки в пристроях *IoT*, відіграє ключову роль у розумінні зростання вразливості цих систем. З огляду на високу складність і збільшення кількості пристроїв *IoT* потреба в удосконаленні безпеки є нагальною. Нові методи та рамки, які використовують інтеграцію методів машинного навчання та глибокого навчання, мають значні можливості для захисту цих пристроїв. Розгляд різноманітних вразливостей *IoT* та обговорення потенційних рішень допомагає визначити ефективні стратегії безпеки. Ці методи та підходи є вкрай важливими для підвищення безпеки вебзастосунків. Використання інноваційних патернів інтеграції *AI* у вебзастосунках може значно підсилити здатність системи виявляти та протидіяти кіберзагрозам. Розроблення таких систем вимагає глибокого розуміння потенційних вразливостей і застосування передових технологій *AI* для створення більш безпечного цифрового середовища. Висвітлення цих аспектів у роботі [7] викликає необхідність інтеграції передових

технологій *AI* у сфері веббезпеки, що стає все більш актуальним у сучасному цифровому світі.

Інтеграція *AI*, *IoT* та кіберфізичних систем (*CPS*) у моніторингу здоров'я відкриває нові перспективи в підвищенні безпеки та ефективності медичних систем. Використання *AI*-підсилених *IoT-CPS* для виявлення різноманітних захворювань з допомогою деяких сенсорів, що аналізують інформацію, застосовуючи алгоритми *AI*, є революційним підходом у сфері охорони здоров'я. Це дає змогу не тільки вчасно виявляти та лікувати хвороби, але й управляти великими обсягами медичних даних, підвищуючи точність та швидкість діагностики. Такий підхід має безпосереднє значення й для підвищення безпеки вебзастосунків. Інтеграція інноваційних патернів *AI* у вебзастосунки може суттєво підсилити здатність систем виявляти небезпеку та протидіяти кіберзагрозам. Це передбачає розроблення та впровадження складних алгоритмів *AI*, здатних аналізувати та вчасно реагувати на підозрілі дії, що підвищує загальний рівень безпеки вебзастосунків [8].

Спільне використання технологій *AI* та блокчейну в системах розумного дому на базі *IoT* відкриває нові можливості для підвищення їх безпеки та ефективності. Такі дослідження охоплюють різні виклики, з якими стикаються системи *IoT* розумного дому, зокрема вразливості до кібератак та проблеми приватності. Пропонуються інноваційні рішення, що використовують *AI* та блокчейн для захисту цих систем від зовнішніх загроз, забезпечуючи надійний та безпечний зв'язок між пристроями. Ці технології можуть бути також застосовані для підвищення безпеки вебзастосунків. Інтеграція інноваційних патернів *AI* у вебзастосунки допомагає створити більш стійкі та адаптивні системи, здатні виявляти ризики та протистояти кіберзагрозам. Використання блокчейну додатково забезпечує безпеку та прозорість у обробленні інформації, підвищуючи довіру та надійність вебзастосунків. Значення інтеграції сучасних технологій у сфері кібербезпеки є актуальним для вебзастосунків, особливо в контексті розумних систем дому [9].

Інтеграція *AI* та *IoT* у сфері охорони здоров'я, відома як *AIoT*, відкриває нові перспективи для покращення медичних послуг. Особливо наголошується на потенціалі *AIoT* у дистанційному моніторингу здоров'я та на управлінні хронічними захворюваннями, наприклад, діабетом і хворобою Паркінсона. Проте, разом з перевагами, виникають і значні виклики, зокрема щодо питань безпеки та

конфіденційності медичних даних у *AIoT*-системах. Це потребує розроблення передових криптографічних рішень і стандартизації, щоб забезпечити належний захист інформації. Така інтеграція *AI* та *IoT* сприяє подальшим дослідженням щодо підвищення безпеки вебзастосунків з допомогою інноваційних патернів інтеграції *AI*. Подібні принципи можуть бути застосовані для підсилення безпеки вебзастосунків, особливо в секторах, де значний обсяг чутливої інформації вимагає надійного захисту. Застосування передових алгоритмів *AI* для аналізу, моніторингу та реагування на потенційні загрози може значно збільшити стійкість вебзастосунків до кібератак [10].

Детальний огляд впровадження "Зрозумілого штучного інтелекту" (ХАІ) у кібербезпеці відкриває нові перспективи для розуміння та використання *AI*. Особлива увага приділяється викликам, пов'язаним із проблематикою "чорної скриньки" *AI* у кібербезпеці, де рішення алгоритмів часто не прозорі. ХАІ пропонує способи, які роблять рішення *AI* більш зрозумілими та прозорими, що є критично важливим для побудови довіри та дотримання регулювань у цій галузі. Включення ХАІ у вебзастосунки дає змогу не тільки покращити захист від кіберзагроз, але й робить процеси прийняття рішень більш прозорими та зрозумілими для користувачів. Це може сприяти кращому розумінню та взаємодії користувачів із захисними механізмами, а також допомагає в розвитку більш стійких та довірених систем [11].

Інтеграція та майбутні тренди *AI* в комп'ютерних технологіях нового покоління відкривають широкі перспективи, особливо в контексті автономного обчислення. Автономія та продуктивність систем на великому масштабі можуть бути значно покращені за допомогою *AI*, але також виникає потреба в "Зрозумілому *AI*" (ХАІ) для забезпечення прозорості та зрозумілості цих процесів. Використання *AI* для автоматизації та оптимізації процесів у вебзастосунках може суттєво збільшити їх ефективність і безпеку. Зокрема застосування ХАІ дозволяє краще розуміти та контролювати, як *AI* приймає рішення в контексті веббезпеки, забезпечуючи більшу прозорість і довіру до цих систем. Результати цих досліджень [12] наголошують на важливості розвитку та інтеграції передових технологій *AI* для створення більш безпечних та ефективних вебзастосунків.

Усебічний аналіз інтеграції *AI* та блокчейну в бізнесі відкриває нові горизонти для розвитку

цих технологій у різних секторах. Використовуючи бібліометрично-контентний підхід, дослідники детально вивчають злиття *AI* та блокчейну та їх застосування в таких галузях, як охорона здоров'я, безпечні транзакції, фінанси та ланцюги постачань. Виявлені тренди й кластери в поточних дослідженнях зосереджують увагу на те, як ці технології можуть доповнювати одна одну, покращуючи ефективність, прозорість та безпеку в бізнес-операціях. Інтеграція *AI* та блокчейну може відіграти значну роль у створенні більш безпечних, надійних і прозорих вебзастосунків. Особливо це стосується секторів, де важливий високий рівень інформації та фінансової безпеки. Використання *AI* для аналізу та передбачення потенційних загроз, а також упровадження блокчейну для забезпечення незмінності та прозорості даних дає змогу значно підвищити ефективність і безпеку вебсистем [13].

Застосування штучного інтелекту в системах планування ресурсів підприємства (*ERP*), особливо на хмарних платформах, відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки цих систем. Перспективи ІТ-фахівців щодо інтеграції *AI* та машинного навчання в ці системи є ключовими для розуміння потенціалу цих технологій. Різні аспекти, такі як виклики інтеграції *AI* в хмарні *ERP*-сервіси, необхідні ресурси для їх імплементації та кращі практики розроблення *AI*-моделей для таких систем, є важливими для успішного впровадження та використання. Застосування *AI* у вебзастосунках, зокрема на хмарних платформах, покращує їх ефективність, автоматизацію та безпеку. Інтеграція *AI* допомагає ефективно виявляти та протидіяти кіберзагрозам, оптимізувати процеси й забезпечити більш високий рівень захисту інформації [14].

Еволюція технологій у галузі охорони здоров'я, зокрема в контексті систематичного моніторингу здоров'я (*SHM*) за допомогою глибинного навчання та *AI*, пропонує нові можливості для поліпшення медичних послуг. Важливим аспектом є використання передових технологій промисловості 5.0 та 5G, які дають змогу розробляти вартісно-ефективні сенсори для реального моніторингу здоров'я. Роль хмарних обчислень у цьому контексті також є значною, оскільки вони допомагають підвищити ефективність медичних послуг. Застосування зазначених технологій у вебзастосунках, зокрема у сфері охорони здоров'я, може значно покращити безпеку та адаптивність таких систем [15].

Огляд етичних аспектів та інцидентів, пов'язаних з *AI*, важливий для розуміння як ключових сфер застосування *AI*, так і потенційних етичних проблем. З використанням інформації з бази даних інцидентів *AI* розглядаються різні сектори, де *AI* впливає на етичні питання, а саме на необхідність етичного проєктування та впровадження в системах *AI*. Особлива увага приділяється важливості регулювання *AI* та розробленню етичних настанов. Метою цього огляду є підвищення обізнаності про етичні виклики, пов'язані з *AI*, та необхідність інтеграції етичних міркувань у процес розроблення *AI*. Це має безпосередній зв'язок з підвищенням безпеки вебзастосунків завдяки інноваційним підходам до інтеграції *AI*. Знання про етичні проблеми та виклики в упровадженні *AI* сприяють створенню більш безпечних вебзастосунків, що відповідають етичним стандартам [16].

Інтеграція *AI* у хмарні технології відкриває нові можливості для підвищення безпеки вебзастосунків, зокрема у фінтех-секторі. *AI* ефективно використовується для виявлення аномалій, запобігання шахрайству, розвідки загроз та оцінювання ризиків, що значно підсилює захист інформації та фінансових операцій у хмарних фінтех-сервісах. Інноваційні патерни інтеграції *AI* дають змогу не тільки виявляти та нейтралізувати потенційні загрози, а й оптимізувати процеси, підвищуючи загальну ефективність систем. Розгляд реальних кейс-стаді, таких як *PayPal* та *Square*, демонструє, як застосування *AI* може значно покращити безпеку фінансових транзакцій. Проте існують певні виклики, пов'язані з упровадженням *AI*, зокрема йдеться про ризики помилкових спрацьовувань та вразливість до ворожих атак. Ці виклики потребують постійного вдосконалення технологій та методів інтеграції *AI* для забезпечення найвищого рівня безпеки [17].

Інноваційні патерни інтеграції *AI* відіграють важливу роль у підвищенні безпеки вебзастосунків, створюючи нові можливості для точного та ефективного оброблення даних. Особливо це важливо у сферах, де висока точність і надійність інформації є критичними. Використання мови програмування *Python* у дослідженнях охорони здоров'я наголошує на її важливості як надійного інструменту для розроблення високоточних медичних застосунків. Особлива увага приділяється алгоритмам машинного навчання, таким як логістична регресія та класифікатор випадкового лісу, що сприяють значному підвищенню точності діагностики серцевих

захворювань. Цей підхід може бути адаптований і застосований у вебзастосунках для підсилення їх безпеки та надійності, забезпечуючи ефективні механізми захисту інформації та оптимізацію процесів її оброблення [18].

AI відіграє значну роль у підвищенні безпеки та ефективності онлайн-іспитів, пропонуючи інноваційні рішення для різних викликів, що виникають у сфері освіти. Особливо важливим є впровадження *AI* для дистанційної ідентифікації, що передбачає технології розпізнавання голосу та обличчя. Це значно покращує надійність і справедливість іспитів, зокрема під час вступу з-за кордону. *AI* також ефективно застосовується в системах оцінювання та в механізмах зворотного зв'язку, що робить освітній процес більш якісним. Однак ці технології несуть і певні виклики, наприклад, ризики шахрайства та підроблення особи в умовах онлайн-іспитів. Інноваційні патерни інтеграції *AI*, які розглядаються в дослідженні, пропонують ефективні рішення для протидії цим проблемам. Зокрема вони спрямовані на трансформацію процесу іспитів, підвищуючи їх безпеку та надійність, а також покращуючи загальний освітній досвід. Отже, *AI* відіграє вирішальну роль у модернізації освітнього процесу, забезпечуючи більшу безпеку та ефективність різного типу іспитів [19].

Інтеграція *AI* у різні технологічні сфери, наприклад Інтернет речей (*IoT*) та технології *5G*, відкриває нові горизонти для розвитку та покращення систем, як-от Смартгрід. Така інтеграція є ключовою для переходу від традиційних електромереж до більш передових, програмно-керованих мереж. Основна увага в цьому разі приділяється підвищенню ефективності та надійності з допомогою застосування інтелектуальних технологій. Упровадження *AI* для моніторингу та інтелектуального прийняття рішень може значно вдосконалити безпеку, швидкість оброблення інформації та надійність вебзастосунків. Еволюція та інтеграція *AI*, *IoT* та *5G*, зокрема в Смартгрід, показує величезний потенціал цих технологій і вказує на широкий спектр можливостей їх використання [20].

Застосування *AI* разом із технологією Інтернету речей (*IoT*) революціонує сферу бібліотекарства, особливо в трьох ключових аспектах: розумне обслуговування, розумна стійкість та розумна безпека. Це перетворення традиційних бібліотек на розумні сприятиме підвищенню оперативної ефективності, управління ресурсами та безпеки.

Так, використання *AI* для моніторингу та аналізу інформації може виявляти потенційні загрози безпеці, покращуючи захист від несанкційного доступу або інших кібератак [21]. Цей перехід від традиційних методів до більш інноваційних, підкріплених *AI* та *IoT*, відкриває нові можливості для розвитку не тільки бібліотечних систем, а й вебзастосунків.

Опис проведених досліджень

У відповідь на сучасні виклики в забезпеченні безпеки цифрових операцій, особливо у сферах електронної комерції та фінансових транзакцій, це дослідження ініціює розроблення спеціалізованої бібліотеки.

Її мета – підвищення безпеки вебзастосунків із допомогою інтеграції алгоритмів штучного інтелекту. Запропонована модель і методологія спрямовані на детальне вивчення та розуміння процесів навчання *AI*, зокрема в контексті аналізу та управління ризиками.

Запропонований підхід оснований на розробленні інноваційної моделі для оцінювання ризиків транзакцій у вебзастосунках. Для цього використовується бібліотека *scikit-learn*, що пропонує широкий спектр алгоритмів машинного навчання. Ці алгоритми здатні аналізувати значні обсяги інформації та виявляти потенційні ризики з високою точністю.

Методологія дослідження охоплює кілька ключових етапів: починаючи з підготовки інформації до побудови та тестування моделі, завершуючи оцінюванням її ефективності. Особлива увага приділяється адаптації моделі до специфічних вимог безпеки вебзастосунків, що є критично важливим для їх надійної експлуатації.

Запропонована модель аналізу фінансових транзакцій спрямована на визначення їх потенційної ризикованості. Модель використовує комплексний набір характеристик транзакцій, зокрема географічне положення (країну проведення), суму платежу, час транзакції та тип платіжної картки, для оцінювання рівня безпеки кожної операції.

Ключовим компонентом дослідження є розроблена модель, що використовує комплексний підхід до оцінювання ризиків транзакцій. Ця модель інтегрує та аналізує різноманітні параметри, а саме: суму платежу, географічне положення, час транзакції та тип картки – для визначення загального ризику.

Кожен параметр розглядається в контексті його впливу на рівень ризику, зважаючи на встановлені порогові значення та критерії. Наприклад, транзакції з великою сумою, що здійснюються в країнах із високим рівнем фінансових шахрайств, або транзакції, що відбуваються в нічний час, можуть бути оцінені як вищі за ризик.

Модель оцінює ризик транзакції за допомогою спеціальної функції, що інтегрує різні параметри, зокрема суму платежу, географічні фактори, час транзакції і тип картки. Загальний ризик транзакції, що первісно визначається сумуванням індивідуальних компонентів ризику (1), кожен з яких має діапазон від 0 до 1, підлягає нормалізації за допомогою спеціальної функції. Функція нормалізації адаптує сукупне значення так, щоб кінцева загальна оцінка ризику також була в межах діапазону від 0 до 1, незалежно від того, чи сума компонентів перевищує 1.

Загальний ризик транзакції:

$$\text{Ризик} = R_p(P) + R_c(C) + R_t(T) + R_k(K), \quad (1)$$

де $R_p(P)$ – це компонент ризику, що аналізує суму платежу, використовуючи логарифмічну функцію для відображення того, як ризик зростає пропорційно до збільшення суми. Визначення цього ризику формулюється як $R_p(P) = a * \log(P+1)$, де a – це коефіцієнт чутливості, що калібрує реакцію моделі на варіації суми платежу. Вихідне значення цього ризику приводиться до діапазону від 0 до 1, щоб забезпечити консистентність масштабування ризику в межах моделі;

$R_c(C)$ – компонент ризику, що оцінює географічні ризики, базуючись на системі вагових коефіцієнтів, що корелюють з історичним рівнем шахрайських дій, пов'язаних із певними країнами. Ці вагові коефіцієнти присвоюються кожній країні згідно з її репутацією у сфері фінансової безпеки: країни, що частіше асоціюються з фінансовими шахрайствами, отримують більш високі значення вагових коефіцієнтів. Унаслідок кінцевий географічний ризиковий компонент, $R_c(C)$, обчислюється таким чином, що його значення завжди залишається в межах від 0 до 1, забезпечуючи збалансований внесок у загальний ризик транзакції;

$R_t(T)$ – ризик, пов'язаний із часом проведення транзакції, з оцінками, що коливаються від 0 до 1. Для виокремлення періодів із підвищеним ризиком використовується гауссівський розподіл з огляду

на значення, що відповідають піковим годинам шахрайства. Формула може бути подана як $R_r(T) = b \times e^{-(T-\mu)^2/2\sigma^2}$, де T – час транзакції, b – множник або коефіцієнт масштабування для гауссівської функції. У контексті запропонованої моделі оцінювання ризику цей коефіцієнт визначає максимальне значення функції, тобто висоту "горба" гауссівського розподілу. Значення b може бути обране залежно від того, наскільки сильно час транзакції має впливати на загальний ризик, а μ та σ визначають години пікового ризику. Отже, функція $R_r(T)$ використовується для моделювання того, як час транзакції впливає на ризик. Час, близький до μ (час піку), дасть вищу оцінку ризику через цю експоненційну функцію, особливо якщо T дуже близько до μ . З іншого боку, час, що значно відрізняється від μ , дає меншу оцінку ризику;

$R_k(K)$ – ризик, асоційований з типом банківської картки, із значеннями, що змінюються від 0 до 1. Цей компонент ризику бере до уваги схильність різних типів карт до шахрайських операцій, присвоюючи вищі ризикові оцінки тим типам карток, що були частіше залучені в шахрайські справи. Використання цього складника дає змогу детально аналізувати ризик на основі предиктивної вартості типу картки, забезпечуючи важливий внесок у загальну оцінку ризику транзакції.

Загальний ризик транзакції порівнюється з установленим порогом безпеки, щоб визначити, чи є транзакція безпечною. Модель постійно адаптується та оновлюється з використанням нової інформації, забезпечуючи точність та актуальність оцінювання ризиків. Цей підхід допомагає не тільки оцінювати безпеку транзакцій у реальному часі, але й аналізувати історичні дані для виявлення тенденцій та вдосконалення моделі. Програмне відтворення розрахунку загального ризику подано на рис. 1.

```
components = [
    calculate_Rp(new_transaction['payment_amount']),
    calculate_Rc(new_transaction['country']),
    calculate_Rt(pd.to_datetime(new_transaction['payment_time']).hour),
    calculate_Rk(new_transaction['card_type'])
]

new_transaction['Risk'] = normalize_risk(components)
```

Рис. 1. Програмне відтворення розрахунку загального ризику

Транзакція вважається безпечною, якщо сумарний ризик залишається нижчим від установленого порогу безпеки, що вимірюється на шкалі від 0% до 100% (або від 0 до 1 в числовому виразі), де 0% відповідає абсолютній відсутності ризику, а 100% – максимальному ризику.

Застосування цієї моделі охоплює як оцінювання безпеки транзакцій у реальному часі, так і аналіз історичних даних. Її можна інтегрувати у фінансові та банківські системи для попередження та виявлення потенційних шахрайств, а також використовувати в дослідницьких та аналітичних цілях для вивчення тенденцій у фінансових операціях.

Для реалізації бібліотеки, спрямованої на підвищення безпеки вебзастосунків, розроблено алгоритм, оснований на використанні штучного інтелекту для аналізу фінансових транзакцій. Цей алгоритм

структурований для оптимізації процесів виявлення та управління ризиками, з упровадженням інноваційних методів машинного навчання. На першому етапі алгоритму відбувається підготовка даних, під час якої система налаштована на оброблення реальних даних транзакцій, отриманих від адміністратора системи. Ці дані, що можуть містити атрибути, такі як географічне положення транзакції, сума, час проведення, тип картки та інші відповідні параметри, проходять процес очищення та нормалізації для забезпечення їх готовності до ефективного аналізу.

На наступному етапі кожна транзакція детально аналізується з використанням розробленої моделі AI (рис. 2). Аналізуються вказані параметри транзакції, зокрема різні ризикові фактори, такі як нестандартні суми, час проведення платежу, а також історичні дані про шахрайство в певних

географічних локаціях. Кожна транзакція отримує оцінку ризику, і якщо ця оцінка перевищує

встановлений поріг, транзакція визначається як потенційно небезпечна.

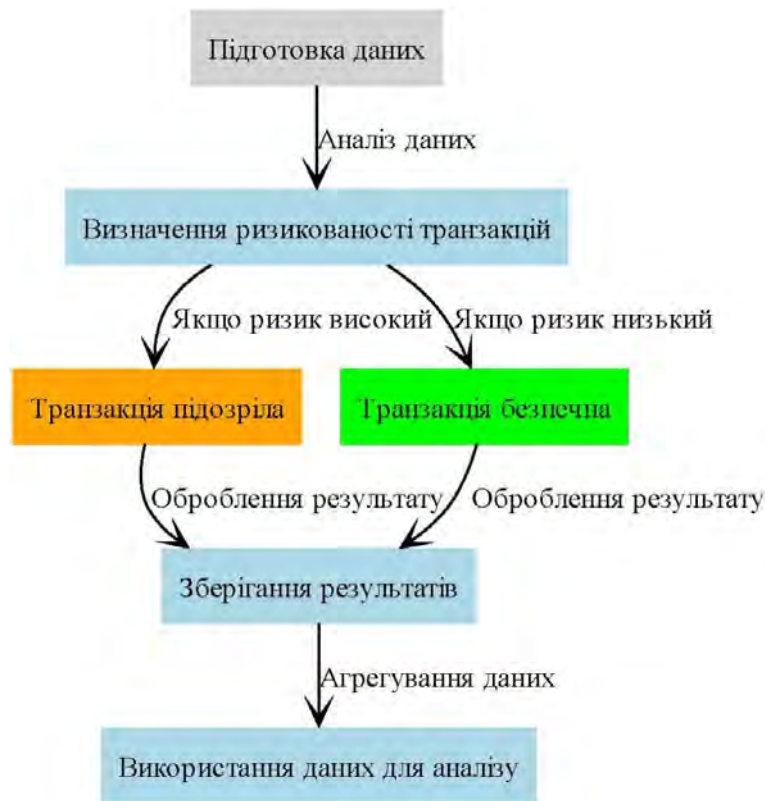


Рис. 2. Схематичне відображення етапів аналізу безпеки транзакцій

Після аналізу результати оброблення кожної транзакції зберігаються для подальшого використання. Інформація про кожну транзакцію, зокрема її параметри та оцінка безпеки, фіксується у форматі *JSON*, що сприяє зручному та ефективному зберіганню даних. Це дає змогу всебічно аналізувати тенденції у фінансових транзакціях, виявляти шахрайські схеми й забезпечувати додаткову інформацію для вдосконалення моделі. Аналітика, що базується на зібраних даних, допомагає виявити слабкі місця в системі та забезпечує інформацію для постійного оновлення алгоритму, збільшуючи його точність і надійність.

Запропонований алгоритм втілює сучасні підходи до застосування штучного інтелекту в аналізі фінансових даних, демонструючи, як інноваційні технології можуть удосконалювати процеси управління ризиками та підвищувати безпеку в цифровому світі. Використовуючи поєднання передових алгоритмів та ретельне оброблення інформації, система пропонує ефективний спосіб

захисту від фінансових шахрайств і забезпечення безпеки користувачів вебзастосунків.

Детальний розгляд математичної моделі та алгоритму, що лежить в основі системи захисту вебзастосунків, веде до опису архітектури програмного забезпечення. Запропоновано *UML*-схему класів (рис. 3), яка ілюструє структуру бібліотеки для інтеграції штучного інтелекту в процес оброблення даних, що надходять через *POST*-запити у вебзастосунках.

Схема розподіляє систему на декілька ключових компонентів для підвищення модулярності та полегшення інтеграції. *DataLoader* відповідає за завантаження вхідної інформації, є початковим етапом оброблення даних, готуючи їх до подальшої передачі. *DataPreprocessor* виконує операції попереднього оброблення, зокрема перетворення інформації в *DataFrame*, логарифмічне перетворення, а також визначення географічних ризиків. *FeatureEncoder* застосовує кодування ознак, необхідне для алгоритмів машинного навчання, трансформуючи категоріальні дані для подальшого оброблення.

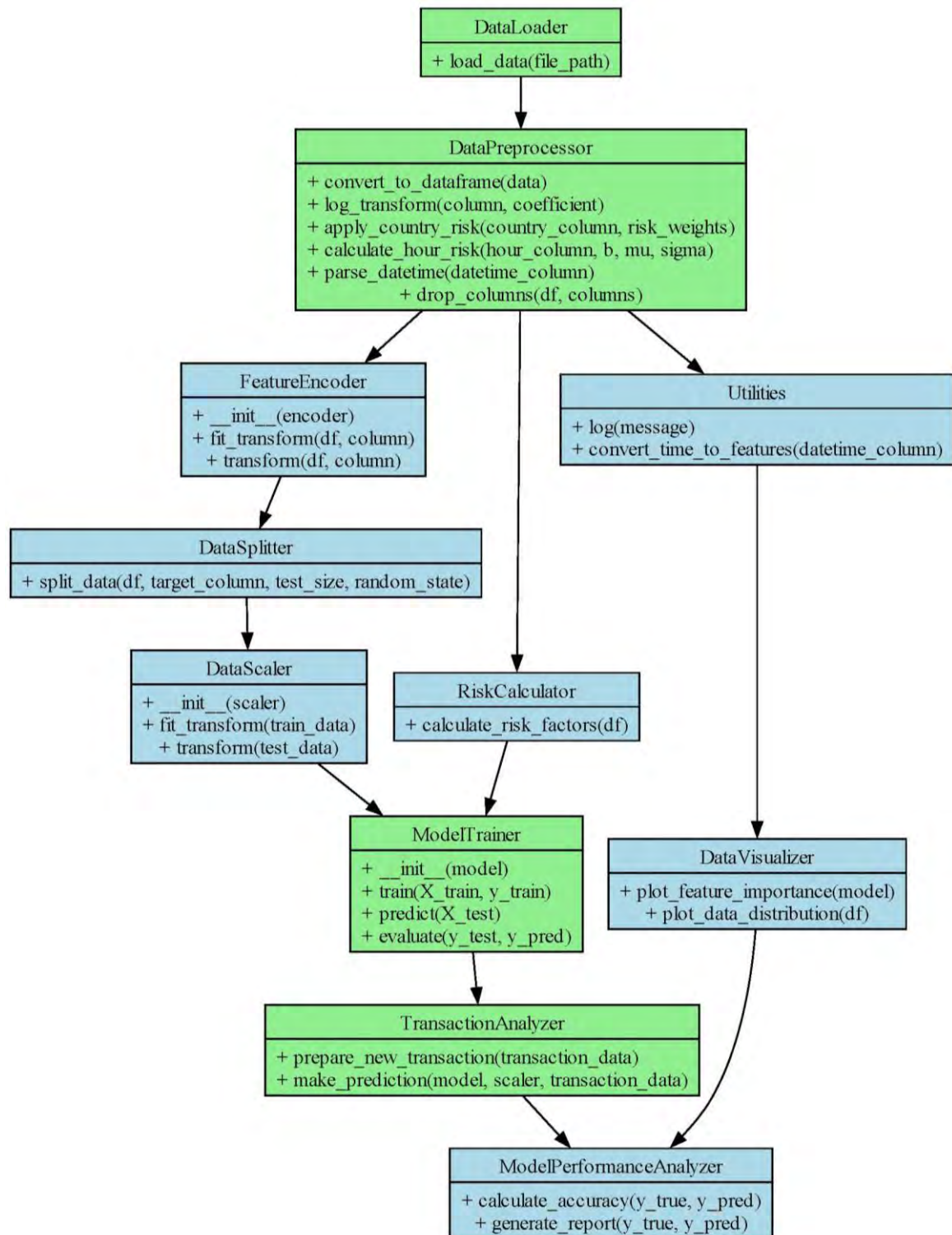


Рис. 3. UML-схема класів бібліотеки з оброблення та аналізу фінансових транзакцій

Компоненти *DataSplitter*, *DataScaler* і *ModelTrainer* забезпечують поділ даних на навчальні та тестові набори, їх нормалізацію, а також навчання та оцінювання моделі. *TransactionAnalyzer* спеціалізується на аналізі нових транзакцій, використовуючи навчену модель для визначення

підозрілих чи безпечних транзакцій. *RiskCalculator* аналізує різні фактори ризику, пов'язані з даними транзакцій, зокрема оцінку ризику на основі географічного розташування.

Utilities надає допоміжні утиліти, такі як журналювання подій та конвертація часових

міток. *ModelPerformanceAnalyzer* та *DataVisualizer* відіграють ключову роль у візуалізації даних та аналізі продуктивності моделі, допомагаючи краще розуміти та оптимізувати прийняття рішень.

Завдяки цій структурі бібліотека не тільки спрощує інтеграцію алгоритмів машинного навчання в застосунки, але й забезпечує гнучкість і розширюваність системи. Кожен клас має визначені відповідальності та взаємодіє з іншими, формуючи згуртовану систему, здатну ефективно обробляти та аналізувати великі обсяги транзакційних даних.

У межах дослідження для навчання та тестування моделі машинного навчання створено таблицю тестових даних (табл. 1), що містить декілька тисяч транзакцій і є важливою для розуміння аналізу та класифікації транзакцій моделлю. Таблиця має такі атрибути:

– країна, подана дволітерним кодом, важлива для визначення ризикованості транзакції, беручи до уваги різні рівні фінансових шахрайств у різних регіонах;

– сума платежу у валютних одиницях, критично важлива для ідентифікації нестандартних або підозрілих транзакцій;

– час платежу, зазначений у форматі "день.місяць.рік година:хвилина", може вказувати на підозрілу активність;

– тип картки (наприклад, *Visa*, *MasterCard*, *Amex*), де різні типи карток можуть мати різні рівні ризику;

– сайт покупки, доменне ім'я вебсайту, важливий індикатор, оскільки деякі сайти можуть бути причетними до шахрайських схем;

– інформація про клієнта, у цьому разі із значенням 'null', що вказує на відсутність конкретної інформації;

– безпека транзакції, булевий індикатор, що показує, чи вважається транзакція безпечною, використовується як цільова змінна для навчання моделі.

Таблиця 1. Таблиця тестових даних

Country	Payment Amount	Payment Time	Card Type	Purchase Site	Client Info	Transaction Safe
UG	418.57	09.04.2023 10:52	MasterCard	bowen-freeman.com	null	TRUE
UA	350000	29.05.2023 10:30	MasterCard	miller-kirby.com	null	TRUE
UA	3112.67	16.01.2023 11:18	Visa	nguyen-winters.com	null	FALSE
UA	4481.02	23.08.2023 6:46	MasterCard	garcia-vincent.biz	null	FALSE
UA	2988.13	21.10.2023 0:37	Visa	dunn.com	null	TRUE
NL	2202.47	24.04.2023 8:32	Visa	nelson-wallace.net	null	FALSE
NI	327.61	30.12.2023 12:33	Visa	yoder.net	null	TRUE
...

Ці тестові дані є основою для "навчання" моделі на реальних даних, даючи змогу з часом стати більш точною у визначенні ризикованих транзакцій. Репрезентативність даних забезпечує для моделі ефективно виявлення шахрайських дій у різних ситуаціях. Можливе розширення набору даних іншими атрибутами, такими як геолокація користувача, історія покупок, поведінкові фактори, може поліпшити здатність моделі до виявлення ризикованих патернів. Також важливо звертати увагу на якість даних, оскільки неповна, розмита або помилкова інформація здатна суттєво вплинути на точність моделі. Очищення даних, оброблення викидів і виправлення помилок є важливими кроками в підготовці набору даних для навчання.

Для детального опису результатів тестування та демонстрації роботи бібліотеки можна долучити два основні сценарії тестування. Перший сценарій демонструє, як бібліотека правильно ідентифікує безпечну транзакцію (рис. 4), а другий – як вона виявляє потенційно ризиковану транзакцію (рис. 5). У кожному сценарії можна навести конкретні приклади транзакцій, параметри, використані для аналізу, та висновки, до яких прийшла модель.

У сценарії ідентифікації безпечної транзакції параметри, такі як країна, сума, час, тип картки, демонструють, що модель визначила цю транзакцію як безпечну. Обґрунтуванням є те, що на основі заданих параметрів і навченої моделі транзакція не відповідає звичайним ознакам шахрайства.

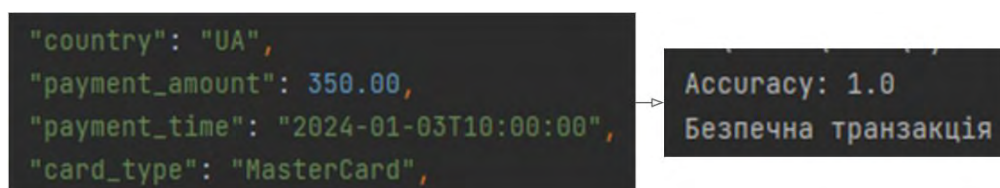


Рис. 4. Тестовий випадок № 1

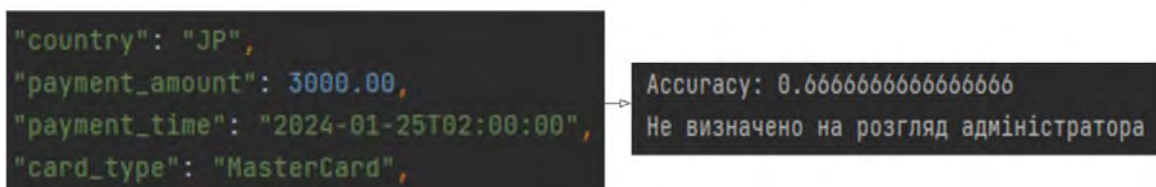


Рис. 5. Тестовий випадок № 2

У сценарії виявлення ризикованої транзакції параметри також містять країну, суму, час, тип картки. Модель визначила цю транзакцію як потенційно ризиковану, оскільки було виявлено декілька підозрілих факторів, наприклад незвичайно висока сума платежу та проведення транзакції в нічний час.

Результати тестування важливі для оцінювання точності та надійності моделі, виявлення потенційних сфер для поліпшення, а також демонстрації адаптованості моделі до різних умов і вимог, що є ключовим для її використання в реальних вебзастосунках.

У дослідженні проведено ґрунтовний аналіз та тестування розробленої моделі штучного інтелекту для оцінювання безпеки фінансових транзакцій у вебзастосунках. Результати тестування підтвердили здатність моделі ефективно ідентифікувати різні типи транзакцій, зокрема безпечні й потенційно ризиковані операції. Модель продемонструвала хорошу точність у виявленні шахрайських патернів, що є ключовим для захисту користувачів від фінансових втрат.

Висновки

У дослідженні запропоновано розроблення програмної бібліотеки, що використовує методи штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення безпеки вебзастосунків, зокрема в контексті фінансових транзакцій. Основну увагу зосереджено на створенні моделі, здатної оцінювати ризикованість транзакцій на основі низки

параметрів, зокрема країни проведення, суми платежу, часу й типу картки.

Робота демонструє, як інтеграція штучного інтелекту в системи оброблення транзакцій може суттєво підвищити їх безпеку, забезпечуючи автоматизоване виявлення потенційно ризикованих операцій. Використання бібліотеки *scikit-learn* для *Python* дало змогу впровадити перевірені та надійні алгоритми машинного навчання, що забезпечили високу точність і надійність розробленої моделі.

Запропоновано псевдокод, що описує потенційну структуру програми, зокрема класи та методи для аналізу транзакцій. Також розглянуто методи генерації тестових даних і наведено приклади тестових результатів, що демонструють роботу моделі в різних сценаріях.

Автори наголошують на важливості використання технологій штучного інтелекту в сучасних вебзастосунках та можливості їх застосування для підвищення безпеки. Подальші дослідження в цій сфері можуть бути спрямовані на розвиток більш складних моделей, здатних зважати на додаткові параметри та взаємозв'язки в даних, а також на інтеграцію моделі в реальні вебзастосунки для випробування її ефективності в реальних умовах.

Запропонована бібліотека робить вагомий внесок у розвиток методів штучного інтелекту та машинного навчання, демонструючи їх практичну значущість та ефективність у сфері захисту фінансових транзакцій і забезпечення безпеки користувачів у цифровому світі.

Список літератури

1. Attkan A., Ranga V. Cyber-physical security for IoT networks: a comprehensive review on traditional, blockchain and artificial intelligence based key-security. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8. P. 3559–3591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00667-z>
2. Sobchuk V., Zamrii I., Laptiev S. Ensuring Functional Stability of Technological Processes as Cyberphysical Systems Using Neural Networks. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 536. P. 581–592. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_53
3. Latif S., Xian Wen F., Iwendi C., Wang L.-l., Mohsin S., Han Z., Band S. AI-empowered, blockchain and SDN integrated security architecture for IoT network of cyber physical systems. *Computer Communications*. 2022. Vol. 181. P. 274–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.029>
4. Bonfanti M. Artificial intelligence and the offense–defense balance in cyber security. *Cyber Security Politics; Socio-Technological Transformations and Political Fragmentation*. 2022. 1st Edition. P. 64–77. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003110224-6>
5. Naik B., Mehta A., Yagnik H., Shah M. The impacts of artificial intelligence techniques in augmentation of cybersecurity: a comprehensive review. *Complex & Intelligent Systems*. 2021. Vol. 8. P. 1763–1780. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00494-8>
6. Abdullahi M., Baashar Y., Alhussian H., Alwadain A., Aziz N., Capretz L., Abdulkadir S. Detecting Cybersecurity Attacks in Internet of Things Using Artificial Intelligence Methods: A Systematic Literature Review. *Electronics*. 2022. 11(2), 198. P. 2–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11020198>
7. Ahanger T., Aljumah A., Atiquzzaman M. State-of-the-art survey of artificial intelligent techniques for IoT security. *Computer Networks*. 2022. Vol. 206. 108771 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108771>
8. Ramasamy L., Khan F., Shah M., Prasad B., Iwendi C., Biamba C. Secure Smart Wearable Computing through Artificial Intelligence-Enabled Internet of Things and Cyber-Physical Systems for Health Monitoring. *Smart Healthcare Systems Based on the Internet of Things and Artificial Intelligence*. 2022. 22(3), 1076. P. 2–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031076>
9. Ghillani D. Deep Learning and Artificial Intelligence Framework to Improve the Cyber Security. *American Journal of Artificial Intelligence*. 2022. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.22541/au.166379475.54266021/v1>
10. Pise A., Almuzaini K., Ahanger T., Farouk A., Pant K., Pareek P., Nuagah S. Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022, Article ID 8421434, 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/8421434>
11. Zhang Z., Al Hamadi H., Damiani E., Yeun C. Y., Taher F. Explainable Artificial Intelligence Applications in Cyber Security: State-of-the-Art in Research. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, P. 93104–93139. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204051>
12. Gill S., Xu M., Ottaviani C., Patros P., Bahsoon R., Shaghghi A., Golec M., Stankovski V., Wu H., Abraham A., Singh M., Mehta H., Ghosh S., Baker T., Parlikad A., Lutfiyya H., Kanhere S., Sakellariou R., Dustdar S., Rana O., Uhlig S. AI for next generation computing: Emerging trends and future directions. *Internet of Things*. 2022. Vol. 19. 100514 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100514>
13. Kumar S., Lim W., Sivarajah U., Kaur J. Artificial Intelligence and Blockchain Integration in Business: Trends from a Bibliometric-Content Analysis. *Information Systems Frontiers*. 2023. Vol. 25. P. 871–896. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10279-0>
14. Yathiraju N. Investigating the use of an Artificial Intelligence Model in an ERP Cloud-Based System. *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*. 2022. Vol. 7, Issue 2. P. 1–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.22161/eec.72.1>
15. Sujith A., Sajja G., Mahalakshmi V., Nuhmani S., Prasanalakshmi B. Systematic review of smart health monitoring using deep learning and Artificial intelligence. *Neuroscience Informatics*. 2022. Vol. 2, Issue 3. 100028 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuri.2021.100028>
16. Nasim S., Ali M., Kulsoom U. Artificial intelligence incidents & ethics: a narrative review. *Computer Science and Information Technology*. 2022. Vol. 2, No 2. P. 52–64. DOI: <http://dx.doi.org/10.54489/ijtim.v2i2.80>
17. Kunduru A. Artificial intelligence advantages in cloud fintech application security. *Central asian journal of mathematical theory and computer sciences*. 2023. Vol. 4, No. 8. P. 48–53 URL: <https://cajmtcs.centralasianstudies.org/index.php/CAJMTCS/article/view/492>
18. Chang V., Bhavani V., Xu A., Hossain M. An artificial intelligence model for heart disease detection using machine learning algorithms. *Healthcare Analytics*. 2022. Vol. 2. 100016 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.health.2022.100016>
19. Babitha M., Sushama C., Gudivada V., Kazi K., Bandaru S. Trends of Artificial Intelligence for Online Exams in Education. *International Journal of Early Childhood Special Education*. 2022. 14(01). P. 2457–2463. URL: https://www.researchgate.net/publication/360513613_Trends_of_Artificial_Intelligence_for_Online_Exams_in_Education
20. Esenogho E., Djouani K., Kurien A. M. Integrating Artificial Intelligence Internet of Things and 5G for Next-Generation Smartgrid: A Survey of Trends Challenges and Prospect. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 4794–4831. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140595>

21. Bi S., Wang C., Zhang J., Huang W., Wu B., Gong Y., Ni W. A Survey on Artificial Intelligence Aided Internet-of-Things Technologies in Emerging Smart Libraries. *AI-Aided Wireless Sensor Networks and Smart Cyber-Physical Systems*. 2022. No. 8. 2991 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22082991>

References

- Attkan, A., Ranga, V. (2022), "Cyber-physical security for IoT networks: a comprehensive review on traditional, blockchain and artificial intelligence based key-security", *Complex & Intelligent Systems*, Vol. 8, P. 3559–3591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00667-z>
- Sobchuk, V., Zamrii, I., Laptiev, S. (2023), "Ensuring Functional Stability of Technological Processes as Cyberphysical Systems Using Neural Networks", *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 536, P. 581–592. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_53
- Latif, S., Xian, Wen F., Iwendi, C., Wang, L.-l., Mohsin, S., Han, Z., Band, S. (2022), "AI-empowered, blockchain and SDN integrated security architecture for IoT network of cyber physical systems", *Computer Communications*, Vol. 181, P. 274–283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.029>
- Bonfanti, M. (2022), "Artificial intelligence and the offense–defense balance in cyber security", *Cyber Security Politics; Socio-Technological Transformations and Political Fragmentation*, 1st Edition, P. 64–77. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003110224-6>
- Naik, B., Mehta, A., Yagnik, H., Shah, M. (2021), "The impacts of artificial intelligence techniques in augmentation of cybersecurity: a comprehensive review", *Complex & Intelligent Systems*, Vol. 8, P. 1763–1780. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00494-8>
- Abdullahi, M., Baashar, Y., Alhussian, H., Alwadain, A., Aziz, N., Capretz, L., Abdulkadir, S. (2022), "Detecting Cybersecurity Attacks in Internet of Things Using Artificial Intelligence Methods: A Systematic Literature Review", *Electronics*, 11(2), 198, P. 2–27. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11020198>
- Ahanger, T., Aljumah, A., Atiquzzaman, M. (2022), "State-of-the-art survey of artificial intelligent techniques for IoT security", *Computer Networks*, Vol. 206, 108771 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108771>
- Ramasamy, L., Khan, F., Shah, M., Prasad, B., Iwendi, C., Biamba, C. (2022), "Secure Smart Wearable Computing through Artificial Intelligence-Enabled Internet of Things and Cyber-Physical Systems for Health Monitoring", *Smart Healthcare Systems Based on the Internet of Things and Artificial Intelligence*, 22(3), 1076. P. 2–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031076>
- Ghillani, D. (2022), "Deep Learning and Artificial Intelligence Framework to Improve the Cyber Security", *American Journal of Artificial Intelligence*, 11 p. DOI: <https://doi.org/10.22541/au.166379475.54266021/v1>
- Pise, A., Almuzaini, K., Ahanger, T., Farouk, A., Pant, K., Pareek, P., Nuagah, S. (2022), "Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues", *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2022, Article ID 8421434, 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/8421434>
- Zhang, Z., Al Hamadi, H., Damiani, E., Yeun, C. Y., Taher, F. (2022), "Explainable Artificial Intelligence Applications in Cyber Security: State-of-the-Art in Research", *IEEE Access*, Vol. 10, P. 93104–93139. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204051>
- Gill, S., Xu, M., Ottaviani, C., Patros, P., Bahsoon, R., Shaghghi, A., Golec, M., Stankovski, V., Wu, H., Abraham, A., Singh, M., Mehta, H., Ghosh, S., Baker, T., Parlikad, A., Lutfiyya, H., Kanhere, S., Sakellariou, R., Dustdar, S., Rana, O., Uhlig, S. (2022), "AI for next generation computing: Emerging trends and future directions", *Internet of Things*, Vol. 19, 100514 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100514>
- Kumar, S., Lim, W., Sivarajah, U., Kaur, J. (2023), "Artificial Intelligence and Blockchain Integration in Business: Trends from a Bibliometric-Content Analysis", *Information Systems Frontiers*, Vol. 25, P. 871–896. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10279-0>
- Yathiraju, N. (2022), "Investigating the use of an Artificial Intelligence Model in an ERP Cloud-Based System", *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*, Vol. 7, Issue 2, P. 1–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.22161/eec.72.1>
- Sujith, A., Sajja, G., Mahalakshmi, V., Nuhmani, S., Prasanalakshmi, B. (2022), "Systematic review of smart health monitoring using deep learning and Artificial intelligence", *Neuroscience Informatics*, Vol. 2, Issue 3, 100028 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuri.2021.100028>
- Nasim, S., Ali, M., Kulsoom, U. (2022), "Artificial intelligence incidents & ethics: a narrative review", *Computer Science and Information Technology*, Vol. 2, No 2, P. 52–64. DOI: <http://dx.doi.org/10.54489/ijtim.v2i2.80>
- Kunduru, A. (2023), "Artificial intelligence advantages in cloud fintech application security", *Central asian journal of mathematical theory and computer sciences*, Vol. 4, No. 8, P. 48–53 URL: <https://cajmtcs.centralasianstudies.org/index.php/CAJMTCS/article/view/492>
- Chang, V., Bhavani, V., Xu, A., Hossain, M. (2022), "An artificial intelligence model for heart disease detection using machine learning algorithms", *Healthcare Analytics*, Vol. 2, 100016 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.health.2022.100016>
- Babitha, M., Sushama, C., Gudivada, V., Kazi, K., Bandaru, S. (2022), "Trends of Artificial Intelligence for Online Exams in Education", *International Journal of Early Childhood Special Education*, 14(01), P. 2457–2463 URL: https://www.researchgate.net/publication/360513613_Trends_of_Artificial_Intelligence_for_Online_Exams_in_Education

20. Esenogho, E., Djouani, K., Kurien, A. (2022), "Integrating Artificial Intelligence Internet of Things and 5G for Next-Generation Smartgrid: A Survey of Trends Challenges and Prospect", *IEEE Access*, Vol. 10, P. 4794–4831. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140595>
21. Bi, S., Wang, C., Zhang, J., Huang, W., Wu, B., Gong, Y., Ni, W. (2022), "A Survey on Artificial Intelligence Aided Internet-of-Things Technologies in Emerging Smart Libraries", *AI-Aided Wireless Sensor Networks and Smart Cyber-Physical Systems*, No. 8, 2991 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22082991>

Надійшла 28.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Замрій Ірина Вікторівна – доктор технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна; e-mail: irinafraktal@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5681-1871>

Шахматов Іван Олександрович – Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, Київ, Україна; e-mail: ivan.shakhmatov@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9628-0365>

Zamrii Iryna – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Head at the Department of Software Engineering, Kyiv, Ukraine.

Shakhmatov Ivan – State University of Information and Communication Technologies, Postgraduate at the Department of Software Engineering, Kyiv, Ukraine.

ENHANCING THE SECURITY OF WEB APPLICATIONS THROUGH INNOVATIVE PATTERNS OF INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Ensuring the security of digital operations, especially in the areas of e-commerce and financial transactions, remains increasingly relevant. Therefore, **the subject** of research is the development of a specialized software library. This library aims to improve the security of web applications. **The purpose** of this study is to develop a software library that uses artificial intelligence and machine learning methods to analyze and improve the level of security of financial transactions. The use of these advanced technologies helps automate the detection of potentially fraudulent or risky transactions, thereby providing a higher level of user protection. The following **tasks** are solved in the article: analysis of modern methods of processing financial transactions and identification of possible security threats; development of a UML diagram of library classes for processing and analyzing financial transactions; testing and validation of the developed artificial intelligence model for assessing the security of financial transactions on real financial data. Machine learning **methods** were defined and applied using the scikit-learn library in Python, the algorithms of which are capable of analyzing large volumes of data and identifying potential risks with high accuracy. This ensures effective integration of artificial intelligence technologies. The following **results** were obtained in the work: the criteria for assessing the riskiness of financial transactions for the identification of potential risks are defined; the program operation algorithm is described, which includes procedures for determining and classifying transaction risks; pseudocode is presented, which illustrates the structure of classes and methods of the model, opening opportunities for its adaptation and scaling; methods of generating test data reproducing realistic scenarios of financial transactions have been developed; an analysis of the results was carried out to assess the effectiveness of the developed model. In **conclusion**, the results of research and testing allow us to evaluate the model's response to various data and its effectiveness in real conditions, as the work presents examples of processing various types of transactions. In addition, the study presents not only the development and validation of the developed model, but also the prospects of its use on a larger scale, integration with existing web applications.

Keywords: Artificial Intelligence; Web Application Security; Financial Transactions; Machine Learning; Data Analysis; Fraud Detection; scikit-learn.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Замрій І. В., Шахматов І. О. Підвищення безпеки вебзастосунків з допомогою інноваційних патернів інтеграції штучного інтелекту. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.067>

Zamrii, I., Shakhmatov, I. (2024), "Enhancing the security of web applications through innovative patterns of integration of artificial intelligence", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 67–80. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.067>

А. КОЗИРСЬ, І. ШУБІН

МЕТОД ЛІНІЙНО-ЛОГІЧНИХ ОПЕРАТОРІВ ТА ЛОГІЧНИХ РІВНЯНЬ У ЗАВДАННЯХ ВИДОБУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Реляційні та логічні методи подання знань відіграють ключову роль у створенні математичного базису для інформаційних систем. Алгебра предикатів і оператори предикатів є одними з найбільш ефективних інструментів для детального опису інформації. Ці засоби дозволяють легко формулювати формалізовану інформацію, створювати запити до баз даних та імітувати людську діяльність. У контексті нової необхідності в надійному та ефективному відборі даних виникає проблема в глибшому аналізі. **Предмет дослідження** – теорія кванторних лінійних рівнянь на базі алгебри лінійних предикатних операцій, формального апарата лінійно-логічних операторів і методів розв'язання логічних рівнянь у завданнях видобування інформації. **Мета роботи** – розроблення методу застосування лінійно-логічних операторів і логічних рівнянь для видобування інформації. Цей підхід може значно оптимізувати вилучення необхідної інформації, навіть у величезних базах даних. **Основні завдання:** аналіз наявних підходів до видобування інформації; розгляд теорії лінійно-логічних операторів; дослідження методів приведення логіки до алгебраїчної форми; аналіз логічних просторів та алгебри скінченних предикатних дій та теорії лінійно-логічних операторів. **Методи дослідження** передбачають систематичний аналіз математичної структури алгебри скінченних предикатів та предикатних функцій для ідентифікації ключових елементів, що впливають на процес формування запитів. Запропоновано метод застосування лінійно-логічних операторів і логічних рівнянь з метою видобування інформації. **Результати** дослідження показали, що метод використання лінійно-логічних операторів та логічних рівнянь є універсальним і адаптивним інструментом для роботи з алгебраїчними структурами даних. Він може бути застосований у широкому спектрі задач видобування інформації та здатний довести свою цінність як один із можливих методів оброблення інформації. **Висновок.** У роботі досліджено формальні методи інтелектуальних систем, зокрема способи подання знань відповідно до особливостей галузі застосування та мови, що дають змогу кодувати ці знання для зберігання в комп'ютерній пам'яті. Запропонований метод можна впроваджувати в розробленні мовних інтерфейсів для систем автоматизованого доступу до інформації, в алгоритмах пошукових систем, для логічного аналізу інформації в базах даних та експертних системах, а також у виконанні завдань, пов'язаних із розпізнаванням та класифікацією об'єктів.

Ключові слова: бази знань; інтелектуальні системи; алгебра скінченних предикатів; логічні оператори; кванторні лінійні рівняння.

Вступ

Здобутки у сфері обчислювальної техніки, у галузях мікроелектроніки та архітектури комп'ютерів установили технічні можливості сучасних обчислювальних пристроїв, такі як висока продуктивність і значна оперативна пам'ять. Це сприяло розширенню спектра завдань, що можуть бути виконані комп'ютерами, і підвищило їх роль у житті людини. Проте цей прогрес частіше має кількісний характер. Просте збільшення функціональних можливостей комп'ютера є ефективним лише за умови, що люди вміють їх ефективно використовувати. Інакше таке зростання стає безперспективним.

Поширення комп'ютерної техніки та її швидке вдосконалення привели до стрімкого розвитку інтелектуальних систем різних видів. Уже існують методи та підходи до створення та використання

інформаційних систем. Сучасні інтелектуальні системи можуть розв'язувати завдання, які раніше вважалися лише людською прерогативою: доводити математичні теореми, перекладати тексти з однієї мови іншою, діагностувати хвороби та виконувати багато інших функцій. Проте ідеальна обчислювальна машина має перевищувати здатність людини до логічного мислення, аналізу інформації та вирішення найскладніших завдань, а також взаємодії з навколишнім середовищем.

Важливу роль у розробленні інформаційних систем відіграють реляційні та логічні методи подання знань. Один з універсальних математичних способів для опису інформації – це алгебра предикатів та предикатних операцій. Ця алгебра дає змогу зручно подавати формалізовану інформацію, створювати запити до баз даних і моделювати діяльність людини.

Метою статті є створення методу із застосуванням розв'язання кванторних лінійних рівнянь на основі алгебри лінійних предикатних операцій, формальних інструментів лінійно-логічних операторів та методів розв'язання логічних рівнянь для задач видобування інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні інтелектуальні системи працюють на основі глибоких знань про конкретну тематику, які вже наявні в їх базі знань. На відміну від зазначеного, старіші системи просто обробляли інформацію за допомогою програм. Є чітке розмежування між даними та знаннями, що підтверджено численними дослідженнями.

Під поданням знань розуміють формалізацію властивих переконань за допомогою фігур, записів або мов. Особливо цікавлять формалізації, сприймані комп'ютером. У зв'язку з цим розробляються формальні мови, що дають змогу відтворювати знання в пам'яті комп'ютера.

Особливість систем подання знань полягає в тому, що вони моделюють діяльність людини, здійснювану часто в нетиповому різновиді. Отже, важливим етапом розроблення інтелектуальних систем є створення оптимальної моделі подання знань про предметну галузь застосунку систем. Вочевидь вибір певного виду подання знань залежить від сфер формалізації. В останні роки була запропонована значна кількість різних моделей подання знань.

У логічній моделі подання знань використовується логіка предикатів першого порядку та виведення результатів за допомогою методу силогізму. Використовувані в логічній моделі різниці предикатів можна легко єднати з доволі ефективним механізмом результату, наприклад резолюцією. Перевагами логічних моделей є одиничність теоретичного обґрунтування та можливість реалізації системи формально точних визначень і результатів. Саме з цієї причини інтелектуальні системи, що використовують логічну модель знань, значно поширені.

Особливістю роботи сучасних інтелектуальних систем є те, що процес оброблення інформації спирається на необхідні знання про проблемну сферу, заздалегідь додані до бази знань системи, тоді як раніше створені системи працювали з інформацією, що просто оброблялась різними програмами. Значна кількість досліджень присвячена

розбіжності даних від знань, зокрема їх основну ідею можна сформулювати так: знання є складно організованими типами даних, що різняться від традиційного подання чотирма основними особливостями:

1) знання розміщують у записі не тільки інформаційну частину, але й описову – у ній містяться всі дані про інформаційну одиницю, які можуть знадобитися в роботі користувача із системою;

2) знання в базі знань створюють складні, як правило, ієрархічні структури, що досягається впровадженням різних відношень на інформаційних одиницях, доданих до бази знань;

3) інформаційні одиниці, що відтворюють знання, можуть композуватися в більш складно організовані одиниці й декомпозуватися в простіші;

4) як частини інформаційних одиниць, що визначають якісь знання, можуть бути приєднані або вбудовані процедури, що дає змогу активізувати ці процедури внаслідок появи в базі знань різних інформаційних одиниць або зв'язків між ними.

Важливим кроком у розробленні таких систем є вибір найкращої моделі для подання знань у певній галузі. Вибір моделі, безумовно, залежить від сфери застосування. В останні роки багато нових моделей подання знань було запропоновано. Однак серед різних способів подання знань, що виникли внаслідок різноманіття структур знань, можна виокремити логічну модель, фреймові та продукційні системи, семантичні сітки. Будь-який спосіб подання має свої переваги й недоліки та пов'язаний з певною структурою та галузями застосування знань.

Як приклад, у роботі [1] розглядається оптимізація запитів *SPARQL* для децентралізованих графів знань, наголошується на ролі методів підвищення продуктивності запитів у розподілених наборах даних, що відкриває нові можливості для ефективної взаємодії з децентралізованою інформацією. У дослідженні [2] висвітлено рамкову концепцію для систем управління документами на основі хмари з інституціональною схемою бази даних, що вказує на розширення можливостей зберігання та доступу до корпоративної інформації, сприяючи гнучкості та масштабованості хмарних рішень. У роботі [3] підхід до інженерії запитів для вилучення структурованих даних з неструктурованого тексту за допомогою бесідних *LLM* відкриває нові перспективи для автоматизації оброблення інформації, зокрема де потрібна швидка адаптація до змінних умов даних. Аналіз кількісного

інтегритету зв'язаних даних на вебi, поданий у роботі [4], пропонує методи для забезпечення достовірності інформації, що є критично важливим для забезпечення надійності семантичних вебданих. Зберігання *Lua*-таблиць у реляційних базах даних, досліджене в статті [5], демонструє можливості інтеграції скриптових мов із традиційними системами управління базами даних, покращуючи гнучкість та ефективність розробки. Дослідження розподілених асинхронних регулярних запитів шляхів на графах, подане в роботі [6], відкриває нові напрями щодо аналізу складних структур даних, зокрема у сферах, де важлива висока продуктивність оброблення зв'язків. У праці [7] обговорюється вплив реконструкції на моделі подання метаданих, вказуючи на ключові фактори, які впливають на ефективність управління знаннями, що є важливим для оптимізації систем зберігання інформації. Об'єктно-орієнтований дизайн бази даних для ефективної класифікації, поданий у роботі [8], наголошує на потенціалі об'єктно-орієнтованих підходів в управлінні складними даними, сприяючи більшій гнучкості та ефективності. Фундаментальні концепції використання та поточні виклики систем управління векторними базами даних розглядаються в дослідженні [9], вказуючи на потенціал для оброблення значних обсягів інформації з високою точністю та швидкістю. У роботі [10] подано систему управління великими просторовими даними на основі *NoSQL*, що відкриває нові перспективи для оброблення просторових даних із високою ефективністю та масштабованістю. Тестування залежностей і правил виведення в базах даних, досліджене в статті [11], виявляє ключові аспекти для забезпечення цілісності та надійності інформації, що є фундаментальним для підтримки якості та безпеки інформаційних систем.

Після ретельного аналізу сучасних досліджень у галузі подання та оброблення інформації в базах даних стає очевидною необхідність розроблення нових методологій, що забезпечили б вищу ефективність оброблення запитів та аналізу даних, особливо в контексті зростання обсягів інформації. Огляд літератури дає змогу визначити наявні виклики та підходи, проте також відкриває перспективи для інновацій, зокрема використання лінійно-логічних операторів і логічних рівнянь у завданнях отримання інформації.

З огляду на визначені потреби та виклики, можна сформулювати **мету роботи** – створення

методу із застосуванням розв'язання кванторних лінійних рівнянь на основі алгебри лінійних предикатних дій і лінійно-логічних операторів для задач видобування інформації, що дасть змогу оптимізувати процеси запитів та аналізу інформації в базах даних. Цей метод передбачає використання складних логічних структур для формулювання та розв'язання задач визначення наявності певної інформації, забезпечуючи водночас високу точність та швидкість оброблення. Для досягнення цієї мети необхідно: проаналізувати наявні методики видобування інформації; ознайомитися з теоретичними основами лінійно-логічних операторів; дослідити способи перетворення логічних виразів у їх алгебраїчний аналог; проаналізувати логічні структури та алгебри, що використовуються для скінченних предикатних дій, а також дослідити теорію лінійно-логічних операторів.

Розроблений метод може бути застосований у створенні мовних систем для автоматизованих інформаційних систем, у системах пошуку інформації, у задачах логічного аналізу в базах даних, експертних системах, а також у вирішенні задач розпізнавання та класифікації об'єктів.

Матеріали й методи

Нещодавно виявлені численні практичні застосування абстрактної алгебри у сферах баз даних і систем штучного інтелекту спонукали до збільшення зацікавленості в алгебраїчному поданні інформації. Водночас практичний досвід вказує на нові неочікувані структури, що розширюють можливості алгебри [12–14]. Завдяки застосуванню алгебраїчних методів у програмуванні створено різноманітні компілятори для високорівневих мов та алгебричні алгоритми.

Автоматизація розроблення програмного забезпечення та проектування комп'ютерних систем є важливим та актуальним завданням у галузі обчислювальної техніки, що вимагає розвитку практично орієнтованої теорії алгоритмів. Одним із ключових завдань цієї теорії є створення оптимального компілятора для перекладу з однієї мови на іншу. Зазвичай, мова вищого рівня, призначена для конкретного спектра завдань, перетворюється на машинну.

Отже, необхідно провести трансляцію з мови програмування на машинну, й оптимізувати вихідний код. Виконання цього завдання передбачає декілька

проміжних кроків, на кожному з яких виконується часткова оптимізація алгоритму та його переклад на проміжну мову, що відповідає цьому етапу.

Нехай $s = \{f\}$ – множина мов і $P = \left\{ \begin{matrix} m \\ f', f'', f \end{matrix} \right.$ – множина трансляторів, кожний з яких є програмою в мові f і перекладає програми із вхідної мови f' на вихідну f'' . Транслятор можна розглядати як унарну операцію, з областю визначення, що репрезентує собою мова f' , і областю значень f'' .

Нехай є транслятори

$$\left\{ \begin{matrix} m^1 \\ f', f'', f_1 \end{matrix} \right. \text{ та } \left\{ \begin{matrix} m^2 \\ f', f'', f_2 \end{matrix} \right. \quad (1)$$

і можна обчислити операцію перекодування в такий спосіб:

$$m^2 \left[\begin{matrix} m^1 \\ f', f'', f_1 \end{matrix} \right] = \begin{matrix} m^1 \\ f', f'', f_2 \end{matrix} \quad (2)$$

Над трансляторами $\begin{matrix} m \\ f_1, f_2, f_1 \end{matrix}$ й $\begin{matrix} m \\ f_2, f_3, f \end{matrix}$ відбувається операція композиції

$$\begin{matrix} m \\ f_1, f_2, f_1 \end{matrix} * \begin{matrix} m \\ f_2, f_3, f \end{matrix} = \begin{matrix} m \\ f_1, f_3, f \end{matrix} \quad (3)$$

За допомогою наведених операцій можна формалізувати процеси, часто використовувані в програмуванні.

Щоб здійснювати еквівалентні переформування алгоритмів, необхідно розробити алгебру для подання алгоритмів, що дасть змогу виконувати такі переформування в зрозумілій алгебраїчній манері.

База даних – це інформаційна система, що зберігає та обробляє інформацію, надаючи відповіді на різноманітні запити. Вона має не лише надавати безпосередньо збережену інформацію, але й здатна виводити додаткову інформацію, базуючись на первинних даних. Цей процес виведення додаткової інформації тісно пов'язаний із реалізацією функцій у розумних системах [15].

У разі застосування алгебраїчного підходу до опису похідної інформації виокремлюється певна алгебраїчна система – алгебра запитів, у термінах якої похідна інформація записується через базисну. Базу даних подамо у вигляді деякої математичної моделі. Припустимо, що система множини даних – доменів – подана як $D = (d_i, i \in F)$, де F – множина імен доменів.

Для кожної системи множини $D = (d_i, i \in F)$ символ $\varphi = \phi$ типу τ реалізується як підмножина відношення в декартовому добутку $D_{i_1} \times \dots \times D_{i_n}$, тип τ характеризує розміщення змінних. Задаємо відображення $n: X \rightarrow F$, що розбиває множину змінних X за розрядами: $X = X_1 \cup \dots \cup X_K$, K – потужність множини F . Множина X має достатню кількість змінних для реалізації різних запитів. Систему показників $D = (d_i, i \in F)$ і введені на ній відношення розглядатимемо як модель. Правило, за яким реалізується будь-який символ φ відношення ϕ , позначимо f . Отже, стан бази даних у розглянутій схемі за умови заданої системи інформації можна визначити як функцію f , яка приписує кожному елементу типу τ відповідну підмножину $\varphi = \phi$ у визначеній $D_{i_1} \times \dots \times D_{i_n}$. Таку модель бази даних позначимо з допомогою (D, ϕ, F) , до того ж символи відношень реалізуються в певні миті. Далі в базі даних необхідно реалізувати можливість запиту. Запит U у стані f позначимо як $f * z$. Відповіді на запити подаються як підмножина D . Множина $f * z$ визначена для базисних запитів U , а довільний запит виражається через базисні запити.

Візьмемо множину всіх підмножин D та позначимо її як MD . Далі множину всіх потенційних запитів позначимо як U . Відповідь на кожен запит U з множини U для будь-якого стану f є частиною MD . Щоб можна було подати будь-який запит за допомогою основних запитів, маємо додати алгебраїчні операції в множині U , що дають змогу маніпулювати запитами. Також необхідно впровадити подібні алгебраїчні операції для множини відповідей. У цьому контексті на основі використаних алгебраїчних операцій можемо визначити відповідь на будь-який запит з огляду на його структуру та подати його з допомогою вже відомих запитів. Розглянуті множини запитів та відповідей утворюють алгебри запитів та відповідей.

Запити до бази даних можна подати у формі формул певної логічної мови, такої як мова різниць висловлювань або різниці предикатів різного рівня. У цьому разі їх виразні здатності можуть розрізнятися. Існують різниці як для класичних, так і неklasичних логік. Наприклад, булеві алгебри кореспондують з класичною різницею висловлювань,

тоді як спеціальні алгебри Гейтінга пов'язані з інтуїціоністською різницею висловлювань.

Різні алгебраїчні структури, пов'язані з порядковою різницею, були запроваджені протягом певного часу. З-поміж них відомі циліндричні алгебри Тарського та поліадичні алгебри Халмоша [12]. Алгебра Халмоша розширюється за допомогою додавання операторів до кванторної алгебри, що ґрунтується на булевій алгебрі з кванторними операціями, доданими до цієї алгебри. Дію квантора можна подати як певну операторну дію в алгебрі. У статті досліджуватимуться різні методи введення таких операторів, але спершу розглянемо геометричний аспект кванторів як операторів.

Припустимо, що маємо змінні x та y , визначені на множині U . Нехай B є підмножиною U , яка є декартовим добутком U . Множина U може бути інтерпретована як бінарний предикат $B(x, y)$, що визначений на U^2 і приймає значення "так" для всіх пар (x, y) у B . Зазначимо проєкції U^2 як U_X та U_Y . Квантор існування, визначений як $\exists x B(x, y)$, вказує на унарний предикат для y на U , що визначає підмножину в U_Y , яка містить елементи B_Y у U_Y , для яких існують відповідні B_X в U_X , так що пара (B_X, B_Y) належить B . Тобто, застосовуючи квантор існування до предиката $B(x, y)$, отримаємо унарний предикат для y , що описує множину B_X . Геометрично $\exists x B(x, y)$ є проєкцією множини B на U_Y (рис. 1).

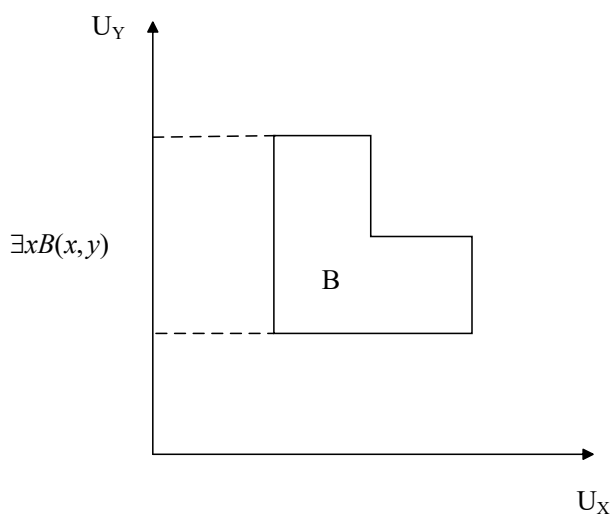


Рис. 1. Графічне подання квантора існування

Аналогічне застосування квантора існування по змінній y до предиката $B(x, y)$ визначає проєкцію множини B на U_Y . Квантор загальності позначається двоїстим виглядом. Геометрично $\forall x B(x, y)$ є проєкція найбільшого циліндра, що лежить в Y на множині U_Y .

Тобто коли розглядаємо квантор існування, фактично шукаємо підмножину властивостей з B , які задовольняють певні умови щодо y , і ця підмножина позначається на просторі U_Y .

З іншого боку, квантор загальності, який позначається на двоїстому вигляді, досліджує загальність деякої властивості для всіх елементів y . Геометрично це можна сприймати як проєкцію найбільшого циліндра, що лежить у Y , на множину U_Y (рис. 2). Це демонструє, як властивості розподіляються або простягаються крізь різні елементи простору Y .

Отже, обидва квантори, існування та загальності, слугують інструментами для аналізу різних аспектів взаємодії між елементами x та y у заданому предикаті $B(x, y)$.

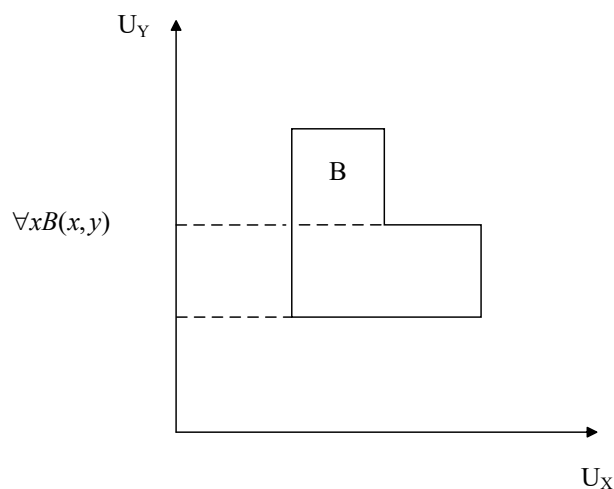


Рис. 2. Графічне подання квантора спільності

У разі багатомісних відношень застосування квантора існування по k змінних $(k < n)$ n -місцевого предиката $P(x_1, \dots, x_n)$, заданого на множині $U_n = U_1 \times U_n$, можна інтерпретувати як проєкцію деякої підмножини множині U_n на множині $U^{n-k} = \prod_{j=1}^{n-k} U_j$. Отже, на множині U^{n-k}

застосуванням квантора існування по k змінних предиката $P(x_1, \dots, x_n)$ позначається $n-k$ місцевий предикат. Цей вираз еквівалентний такому рівнянню (4):

$$\exists(x_{i_1}, \dots, x_{i_k}) P(x_1, \dots, x_n) = Q(x_{i_{n-k}}, \dots, x_n). \quad (4)$$

$$\exists(x_1, \dots, x_{n-1}) P(x_1, \dots, x_n) \wedge R_1(x_1) \wedge \dots \wedge R_{n-1}(x_{n-1}) = Q(x_n), \text{ якщо } R_1(x_1) = 1, \dots, R_{n-1}(x_{n-1}) = 1. \quad (5)$$

Отже, квантор існування може бути розглянутий як лінійний оператор щодо операції диз'юнкції з певною додатковою вимогою (5). Квантор загальності можна характеризувати як лінійний щодо операції кон'юнкції логічний оператор із певним додатковим обмеженням.

Хоча предикати першого порядку мають внутрішні обмеження, що впливають з того, що їх властивості, визначені "неперекривними межами опису, які чітко встановлені та обмежені", сучасні вимоги до інформаційних систем стосуються розширення дескриптивних засобів використовуваних логічних мов [16]. Можемо адаптувати синтаксичні правила мови логіки предикатів першого порядку, щоб додати можливість користування змінюваними предикативними символами. Ця модифікація синтаксису приводить до системи, відомої як логіка предикатів другого порядку, де можна застосовувати як аргументи предикатів не лише терми, а й вислови предикатів першого порядку. Неминуче, що ця нова система має більше дескриптивних засобів, ніж логіка предикатів першого порядку.

Використовуючи логіку предикатів другого порядку, можна встановити зв'язок з алгеброю предикатів і предикатних операцій. Отже, залежно від обраної бази для даних чи знань необхідно обрати відповідну алгебру для запитів та відповідей. Базу даних можна розглядати як машину певного типу

$$(L, U_{\text{зан}}, U_{\text{від}}), \quad (6)$$

де L – множина станів автомата; $U_{\text{зан}}$ – алгебра запитів і $U_{\text{від}}$ – алгебра відповідей. Далі позначається операція $L \times U_{\text{зан}} \rightarrow U_{\text{від}}$, яка має результат у множині відповідей. Якщо $l \in L$ – стан бази даних, $U_{\text{зан}} \in U_{\text{зан}}$ – деякий запит у базі даних, то $l * U_{\text{зан}} = U_{\text{від}}$ є відповіддю на зауважений запит $U_{\text{зан}}$ у належному стані бази. Подання бази даних у вигляді алгебраїчної структури виявляється корисним у різних випадках.

Наприклад, у разі необхідності визначити відхилення композицій та декомпозицій баз даних,

За умови $k = n-1$ наведена рівність є окремим випадком лінійного щодо операції диз'юнкції оператора (5).

Коли $k = n-1$, ця рівність стає окремим випадком лінійного оператора, що діє через операцію диз'юнкції.

а також з ізоморфізму та еквівалентності структур даних, алгебраїчний підхід дозволяє формалізувати ці процеси. Це спрощує аналіз структурних відмінностей між різними схемами даних, дозволяючи автоматизувати процеси виявлення і коригування несумісностей. Завдяки точним алгебраїчним операціям можна ефективно працювати з великими обсягами даних, оптимізуючи процеси інтеграції та синхронізації інформаційних ресурсів.

Реляційна модель даних посідає важливе місце в теорії баз даних [17]. Зазначена модель демонструє переваги алгебраїчного методу подання інформації. Код уперше описав ключові елементи реляційної алгебри, зокрема способи формулювання запитів до баз даних із використанням мов реляційної алгебри [18]. Вона містить операції, такі як селекція, проєкція та теоретико-множинні об'єднання. Однією з ключових особливостей реляційної алгебри є її замкненість: будь-яка її операція генерує нове відношення, до якого можна застосовувати ті самі операції. На відміну від інших мов, де для складних запитів потрібно вводити додаткові структури, у реляційній алгебрі можна легко формулювати запити будь-якої складності без додавання нових конструкцій.

Під час створення реляційних баз даних інформація про тематику подана через взаємодії певної структурної складності. Цей метод відображення даних також ефективний для створення експертних систем різного призначення. Кожен такий взаємозв'язок може бути поданий як окремий предикат, що кодується рядом з нулів і одиниць. Це дозволяє перетворити інформацію із взаємодій у двійкові коди фіксованої довжини.

Велика множина двійкових кодів відтворює наявність глибоких логічних зв'язків між ними. Деякі коди можуть бути виведені з інших за допомогою логічних операцій, показуючи повноту наявної інформації. Для вивчення цих залежностей потрібні вдосконалені математичні методи, щоб коректно описувати відношення між кодами на логіко-алгебраїчному рівні.

У контексті алгебри двійкових кодів основні операції є логічними функціями, що застосовуються до кодів на бітовому рівні. Існує також концепція базових кодів – елементів, з яких можна отримати будь-який інший код з допомогою наявних операцій. Важливим є поняття систем двійкових кодів, які є несприведеними для певних операцій, тобто елементи, які не можна отримати через комбінації інших. Зважаючи на різні підходи до оброблення інформації, із численних перетворень інформації, закодованої у двійковій формі, особливий інтерес мають лінійні перетворення, зосереджені на диз'юнкції або кон'юнкції кодів.

Лінійним щодо операції диз'юнкції перетворенням, визначеним на множині двійкових кодів, є оператор A , що переправляє один код в інший і відповідає таким двом умовам:

$$\begin{cases} A(0) = 0 \\ A(X \vee Y) = A(X) \vee A(Y), \end{cases} \quad (7)$$

де $0 = (0, \dots, 0)$, $X = (x_1, \dots, x_n)$. Відповідно оператор, лінійний щодо кон'юнкції, позначається двоїстим виглядом.

Відповідні умови виписуються в другому вигляді:

$$\begin{cases} A(0) = 0 \\ A(X \vee Y) = A(X) \vee A(Y). \end{cases} \quad (8)$$

За допомогою додавання лінійних операторів до наявних операцій алгебри двійкових кодів ми створили алгебраїчну систему з цікавими характеристиками. Ця алгебра разом із диз'юнктивною, кон'юнктивною та алгеброю постановних дій дає змогу використовувати зрозумілий алгебраїчний мовний інструментарій для формалізованого вираження умов, які має виконувати зазначена система взаємодій. Це особливо корисно, коли інформація, кодована двійковими кодами, проявляє лінійні та узгоджені характеристики.

Дослідження зосереджено на вивченні алгебри лінійних предикатних дій, їх характеристик та методів застосування, а також на методах розв'язання кванторних лінійних рівнянь. Потенціал лінійних предикатних дій у зв'язному висновку для відтворення лінгвістичних закономірностей та виконання завдань розпізнавання та класифікації об'єктів наголошує на важливості цього напрямку дослідження. Методи розв'язання кванторних лінійних рівнянь відіграють вирішальну роль у сфері баз даних. По-перше, квантори дозволяють формулювати глибокі

та деталізовані запити, зважаючи на умови "для всіх" або "існує", що значно розширює можливості взаємодії з інформацією. По-друге, ефективність цих методів сприяє оптимізації процесів вибірки, забезпечуючи швидке й менш ресурсомістке виконання запитів.

Крім того, методи з кванторами сприяють підтримці логічної цілісності в базах даних, гарантуючи, що записи, які відповідають певним умовам, існують або не існують у відповідних секторах. Завдяки високому рівню абстракції цих методів користувачі можуть з легкістю розуміти та інтерпретувати складні логічні умови.

Така гнучкість є незамінною в проєктуванні баз даних, оскільки вона дає змогу розробникам адаптувати систему до різних логічних структур і сценаріїв реального життя. Не менш важливо, що в контексті сучасних інтегрованих рішень зі штучним інтелектом кванторні лінійні рівняння можуть слугувати інструментом для глибокого аналізу даних.

З огляду на ці аспекти методи розв'язання кванторних лінійних рівнянь у базах даних не лише підвищують ефективність і точність запитів, але й сприяють кращому обслуговуванню користувачів, забезпечуючи високу продуктивність систем.

Вирішення завдання

Дані щодо модельованої системи є ключовою інформацією, що допомагає зрозуміти та обробити конкретну задачу. Насамперед необхідно брати до уваги розмірність задачі, яка вказує на складність системи й може містити інформацію про кількість використовуваних параметрів та їх взаємозв'язок.

Семантичні ознаки вказують на властивості вхідного вектора даних. Ці ознаки допомагають системі розпізнавати та інтерпретувати інформацію, передану в модель, забезпечуючи, щоб вхідні дані відтворювали реальність і відповідали вимогам задачі.

Система логічних рівнянь є центром цієї моделі. Вона містить рівняння, що описують взаємозв'язок між різними параметрами, а також умови та обмеження, які мають бути виконані. Ця система слугує основою для аналізу вхідної інформації та знаходження потрібних рішень.

Після того, як вся вхідна інформація буде оброблена програмною системою, ініціюється перевірка на несуперечність системи логічних рівнянь. Це критично важливий крок, оскільки гарантує, що отримані рішення є правильними та обґрунтованими.

Крім того, система визначає та вилучає несуттєві ознаки, що можуть ускладнювати рішення.

На завершення обчислення отримуємо весь масив можливих вирішень системи логічних

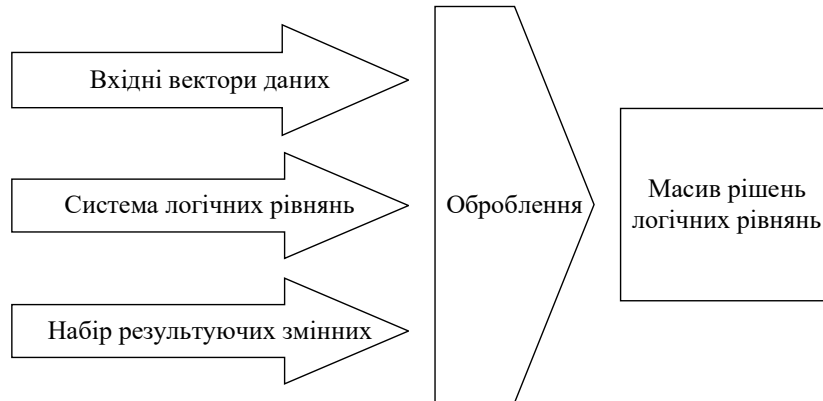


Рис. 3. Об'єктна модель

Ґрунтуючись на теорії лінійних логічних операторів, можемо перейти до етапу побудови алгоритму розв'язання рівнянь. Ця теорія забезпечує необхідний математичний апарат і понятійний базис, що спрощує процес створення алгоритмічної структури.

Нехай потрібно розв'язати таке предикатне рівняння:

$$Q(Y) = \exists X (P(X) \wedge K(Y, X)). \quad (9)$$

Предикати $Q(Y)$ і $P(X)$ задані на ділянці $U = (U_1, \dots, U_n)$, що містить n елементів, бінарний предикат $K(Y, X)$ заданий на ділянці $U \times U$. Потрібно обчислити предикат $P(X)$, якщо відомі предикати $Q(Y)$ і $K(Y, X)$.

З огляду на те, що предикатна змінна X пов'язана квантором існування, рівняння (9) матиме вигляд

$$Q(Y) = \bigvee_{j=1}^n (P(u_j) \wedge K(Y, u_j)). \quad (10)$$

Рівність (10) виконується тільки тоді, коли вона задовольняє умови для всіх можливих значень предикатної змінної Y з множини U . Отже, маємо такі n рівностей:

$$Q(u_i) = \bigvee_{j=1}^n (P(u_j) \wedge K(u_i, u_j)) \quad (11)$$

для будь-якого $i \in 1, \dots, n$.

Значення предикатів $Q(u_i)$ і $P(u_j)$ позначимо відповідно y_i і x_j , де $y_i, x_j \in \{0, 1\}$ і $i, j \in 1, \dots, n$.

рівнянь (рис. 3). Ці рішення подаються у вигляді таблиць, графіків або в будь-якій іншій формі, що найкраще відповідає конкретній задачі та потребам користувача.

Значення бінарного предиката $K(u_i, u_j)$ позначимо як $k_{ij} \in \{0, 1\}$, $i, j \in 1, \dots, n$. Зважаючи на додані позначки, рівність (11) матиме вигляд

$$y_i = \bigvee_{j=0}^n (x_j \wedge k_{ij}). \quad (12)$$

Відомо, що якщо для довільних предикатів $P(t)$ і $Q(t)$ виконується співвідношення $\psi: P(t) \rightarrow X$, тоді правильно також і $\psi: (P(t) \vee Q(t)) \rightarrow X \vee Y$. Звідси здобуємо операторне рівняння вигляду

$$K(X) = Y, \quad (13)$$

де K – лінійний логічний оператор, заданий на просторі E_{\vee}^n , з матрицею оператора

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & \dots & \dots & \dots & k_{1n} \\ \vdots & \ddots & \dots & \ddots & \vdots \\ k_{i1} & \dots & k_{ij} & \dots & k_{in} \\ \vdots & \ddots & \dots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & \dots & \dots & \dots & k_{nn} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Отже, предикатне рівняння (9) еквівалентне операторному (13), визначеному на логічному просторі E_{\vee}^n . Відповідно до ідеї про суцільний тип матриці лінійно-логічного постійного оператора, що діє з простору E_{\vee}^n , для зворотності необхідно й достатньо, щоб у кожному рядку й стовпці матриці такого оператора був один і тільки один елемент, який дорівнює одиниці. Якщо матриця (14) задовольняє зазначені вище умови ідеї, то розв'язання рівняння (13) буде таким:

$$X = K^{-1}(Y). \quad (15)$$

Матриця зворотного оператора збігається із транспонованою матрицею оператора K . Отже, розв'язання операторного рівняння (15) у матричному типі буде таким:

$$X = RT \times Y. \quad (16)$$

Після розв'язання предикатне рівняння (9) можна записати у вигляді

$$P(X) = \exists Y(Q(Y) \wedge K(X, Y)). \quad (17)$$

У разі, якщо оператор K не є регулярним, розв'язок предикатного рівняння записати у вигляді (17) не можна, однак, скориставшись алгебраїчним записом предикатного рівняння (9), будемо шукати розв'язок рівняння в такий спосіб.

Операторне рівняння (13) напишемо у вигляді системи логічних рівнянь. Припустимо, що вектор Y не одиничний.

$$\begin{cases} \bigvee_{j=1}^n (k_{1j} \wedge x_j) = y_1 \\ \bigvee_{j=1}^n (k_{ij} \wedge x_j) = y_i \\ \bigvee_{j=1}^n (k_{nj} \wedge x_j) = y_n \end{cases} \quad (18)$$

Нехай одиниці розташовані в Y на місцях $(d_1, \dots, d_{y^{(i)}}) = D$, а нулі на місцях $(z_1, \dots, z_{y^{(i)}}) = Z$, $D \cap Z = \emptyset$, $D \cup Z = N$, $N = (1, \dots, n)$. Множина індексів, на яких елементи вектора X дорівнюють нулю, позначимо як $L = (l_1, \dots, l_{x^{(i)}})$. Символом * позначатимемо місця, на яких можуть бути нулі або одиниці. Символи * розташовані на місцях $(m_1, \dots, m_{x^{(i)}}) = M$.

Наведемо узагальнені кроки методу.

1. Ініціалізація. $i := z_1$.

2. Створюємо множину з координат вектора X , які дорівнюють нулю.

2.1. $j := 1$.

2.2 Якщо $K[i, j] = 1$, то $X[j] := l_1$.

2.3 Організуємо перебір індексів j від 0 до n .

3. Індексу i прирівнюється наступний елемент із множини Z і перехід до п. 2.1 доти, доки не будуть обрані всі елементи множини Z .

4. Формуємо множину M . Отримуємо деякий логічний вектор X , що містить нулі та символи *.

5. Перевірка системи (18) на несуперечність.

5.1 Підставляємо знайдений вектор у систему.

5.2 Організуємо розв'язання отриманої системи згідно з формулою $\bigvee_{j=1}^n (k_{ij} \wedge x_j) = y_i$.

5.3 Якщо система не сумісна, то вектор не є розв'язком системи.

6. Формування розв'язання системи.

6.1 У вектор $X^{(*)}$ підставляємо замість першого символу * одиницю, а замість інших символів нулі.

6.2 Перехід до п. 5.

6.3 Якщо сформований логічний вектор є розв'язком системи, запам'ятовуємо його в масив вирішень.

6.4 Організуємо різні підстановки нулів і одиниць замість символів * з переходом у разі кожної нової комбінації до п. 5.

7. Випишемо всі отримані розв'язки системи, якщо масив вирішень не порожній. А якщо ні, то результат повідомлення про суперечливість системи.

Приклад

Наведений приклад ілюструє можливість використання теорії лінійно-логічних операторів і методу розв'язання кванторного предикатного рівняння для оброблення та зберігання інформації в базах даних. Припустимо, що база даних розміщує інформацію про чотири фабрики, що виготовляють деталі для автомобілів. Нехай фабрика f_1 виготовляє деталі d_1 і d_2 , фабрика f_2 – деталі d_2 і d_3 , фабрика f_3 – деталі d_1 і d_4 і фабрика f_4 виготовляє деталі d_3 і d_4 .

Зв'язок між фабриками та деталями може бути поданий за допомогою такого бінарного предиката (19):

$$P_1(f, d) = \begin{cases} 1, \text{ якщо фабрика } f \text{ виготовляє деталь } d, \\ 0 \text{ в іншому разі,} \end{cases} \quad (19)$$

де $f \in \{f_1, \dots, f_4\}$ і $d \in \{d_1, \dots, d_4\}$.

Отже, інформацію про фабрики можна подати за допомогою формули предиката $P_1(f, d)$. Якщо потрібно визначити, які фабрики виготовляють деталь d_1 , відповідний предикат, який відтворює цей запит, може бути записаний таким чином:

$$P_2(d) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } d = d_1, \\ 0 \text{ в іншому разі.} \end{cases} \quad (20)$$

Як результат, предикат $P_3(f)$, що відповідає шуканому запиту, подається у формі кванторного рівняння:

$$x \exists d P_1(f, d) \wedge P_2(d) = P_3(f) \quad (21)$$

і задає такий взаємозв'язок:

$$P_3(f) = \begin{cases} 1, & \text{якщо фабрика } f \text{ виготовляє деталь } d_1, \\ 0 & \text{в іншому разі.} \end{cases} \quad (22)$$

Розв'язок зазначеного кванторного предикатного рівняння впливає з розв'язування відповідного операторного рівняння $A * X = Y$ у лінійно-логічному просторі E_n . Матриця оператора A має такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (23)$$

а вектор $X = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$. Унаслідок застосування оператора A до вектора X отримуємо вектор Y зі значеннями $(1 \ 0 \ 1 \ 0)$, що вказує на те, що фабрики f_1 та f_3 виготовляють деталь d_1 . Отже, пошук потрібної інформації у базі даних трансформується в дію операторного множення. Далі, якщо нам потрібно визначити, які фабрики виготовляють деталі d_1 і d_3 , використовуючи адитивний характер лінійного логічного оператора A , отримаємо:

$$A * X_1 \vee A * X_3 = A(X_1 \vee X_3) = A * X_4. \quad (24)$$

$$K_1(m, d) = \begin{cases} 1, & \text{якщо в автомобілі } m \text{ використовується деталь } d, \\ 0 & \text{в іншому разі,} \end{cases} \quad (26)$$

де $m \in \{m_1, \dots, m_4\}$ і $d \in \{d_1, \dots, d_4\}$. Подібно до попередньої ситуації, із бази даних можна легко визначити, в яких автомобілях використовуються певні деталі, якщо застосувати рішення відповідного кванторного рівняння та перетворити його на операторне рівняння. Тоді маємо такий вираз:

$$\exists d K_1(m, d) \wedge K_2(m) = K_3(d), \quad (27)$$

де унарні предикати $K_2(m)$ і $K_3(d)$ задають, відповідно, конкретний автомобіль і конкретну деталь. Розкриваючи зазначене рівняння за допомогою предикатів $K_2(m)$ чи $K_3(d)$, зможемо отримати потрібну інформацію з бази даних. Розглянемо більш складне завдання: визначити, які фабрики виготовляють компоненти для конкретного

Вектори X_1 та X_3 формуються на основі предикатів, що відповідають деталям d_1 та d_3 . Тому відповіді на комплексні запити в базі даних впливають з розв'язку операторних рівнянь. Застосовуючи алгоритм розв'язання таких рівнянь, описаний у попередній секції, можна визначити, які деталі виготовляють певні фабрики. Наприклад, нам потрібно з'ясувати, які деталі виготовляє фабрика f_2 . Тоді логічний вектор Y дорівнює $(0 \ 1 \ 0 \ 0)$. Розв'язуючи операторне рівняння такого типу, отримаємо

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Щодо X маємо вектор $(0 \ 1 \ 0 \ 0)$ і $(0 \ 0 \ 1 \ 0)$. Отже, фабрика f_2 виготовляє деталі d_2 і d_3 .

Згадаймо, що в базі даних зберігається інформація про деталі, що встановлюються в різних автомобілях. Як приклад, в автомобілі m_1 застосовується деталь d_2 , в автомобілі m_2 встановлені деталі d_2 та d_3 , в автомобілі m_3 – також деталі d_2 і d_3 , а в m_4 – деталі d_3 і d_4 . Ця залежність між автомобілем та деталями подана за допомогою бінарного предиката $K_1(m, d)$, що визначений так (25):

автомобіля. Для цього завдання маємо такий набір кванторних предикатних рівнянь:

$$\begin{cases} \exists d P_1(f, d) \wedge P_2(d) = P_3(f), \\ \exists d K_1(m, d) \wedge K_2(m) = P_2(d). \end{cases} \quad (28)$$

$$\text{Цю систему відтворимо у вигляді рівняння} \\ \exists d P_1(f, d) \wedge (\exists d K_1(m, d) \wedge K_2(m)) = P_3(f). \quad (29)$$

Кванторному предикатному рівнянню (27) відповідає операторне рівняння вигляду

$$B * T = X \quad (30)$$

у лінійно-логічному просторі E_n . Логічні вектори T і X побудовані відповідно до бінарних предикатів $K_2(m)$ і $K_3(d)$.

Лінійний логічний оператор Y має матрицю такого вигляду:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (31)$$

побудовану за бінарним предикатом $K_1(m, d)$. Отже, предикатному рівнянню (28) відповідає операторне рівняння вигляду

$$A(B(T)) = X. \quad (32)$$

Отримане рівняння перетворимо на такий вигляд:

$$C(T) = X, \quad (33)$$

де лінійний логічний оператор C дорівнює суперпозиції операторів A і B . У цьому разі маємо

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Отже, пошук значної кількості інформації в базі даних можна спростити до матричного обчислення оператора I_3 , використовуючи операцію множення матриць операторів A та B . Розглянемо, наприклад, фабрики, що виготовляють деталі для автомобіля m_1 . Кореспондуючий логічний вектор T поданий у вигляді $(1 \ 0 \ 0 \ 0)$. Отже маємо

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Отже, виробниками деталей для автомобіля m_1 є фабрики f_1 і f_2 .

Результати дослідження

Під час дослідження розроблено метод, оснований на застосуванні кванторних лінійних рівнянь та теорії лінійно-логічних операторів для формування запитів у базах даних. Розроблено комплексну математичну модель, яка дає змогу кодифікувати запити до баз даних у формі кванторних лінійних рівнянь, що значно розширює межі можливостей оброблення даних. Запропонована модель виявилася здатною ефективно маніпулювати як простими, так і складними запитам.

Метод застосування кванторних логічних лінійних рівнянь для створення запитів у базах даних може бути адаптованим до конкретних потреб і умов використання. Перелічимо деякі з можливих підходів.

1. Розроблення спеціалізованого програмного забезпечення: створення програмних інструментів або модулів, що інтегруються із сучасними системами управління базами даних (СУБД) для оброблення та оптимізації кванторних логічних лінійних запитів. Це може передбачати розроблення інтерфейсів для легкого формування таких запитів користувачами.

2. Упровадження мов високого рівня: розширення наявних мов запитів, зокрема *SQL*, новими конструкціями, що дають змогу формулювати кванторні логічні лінійні рівняння безпосередньо. Це може потребувати додаткового компілятора або інтерпретатора, що транслюватиме ці розширення у виконувани запити.

3. Інтеграція з вебсервісами: розроблення вебсервісів або *API*, що дають змогу користувачам надсилати кванторні логічні лінійні рівняння як запити до бази даних з допомогою інтернету. Це може забезпечити більш широкий доступ до функціоналу для розробників, які працюють із різними платформами.

Застосування цих методів вимагатиме детального розуміння особливості домену, де вони використовуватимуться, а також глибоких знань у галузі баз даних і програмування. Однак потенціал, який вони відкривають для оптимізації та автоматизації оброблення інформації, робить їх дуже перспективними для подальшого розвитку та впровадження.

4. Аналітика даних: застосування для складних аналітичних запитів у великих базах даних, зокрема для фінансового аналізу, наукових досліджень і соціальних мереж. Методику можна використовувати для виявлення складних взаємозв'язків та закономірностей в інформації.

5. Штучний інтелект та машинне навчання: інтеграція із системами ШІ для формування та оптимізації запитів до баз даних у процесі машинного навчання. Це може поліпшити якість інформації, що використовується для тренування моделей, забезпечуючи більш точні прогнози та аналітику.

6. Розроблення прикладних програм: використання в спеціалізованих програмних застосунках, наприклад, у системах електронного урядування, медичних інформаційних системах або системах управління ресурсами підприємства (*ERP*), для забезпечення більш ефективного доступу до інформації та її оброблення.

7. Оптимізація внутрішніх процесів: покращення внутрішніх процесів у компаніях завдяки оптимізації запитів до корпоративних баз даних, що може зменшити витрати часу на оброблення інформації та підвищення продуктивності.

Важливою особливістю запропонованого методу, на відміну від традиційних підходів до виконання запитів до баз даних, є його здатність забезпечувати більшу адаптивність у формулюванні запитів, використовуючи складні логічні операції та квантори. Така гнучкість у поєднанні з ефективністю оброблення суттєво знижує часові витрати на оброблення запитів.

Застосування розробленого методу має великий потенціал у багатьох сферах, що вимагають швидкого та точного аналізу значних обсягів інформації, зокрема фінансовий аналіз, наукове дослідження та управління складними інформаційними системами тощо.

Досягнуті результати відкривають перспективи для подальшого розвитку напряму дослідження, зокрема щодо вдосконалення наявних алгоритмів розв'язання кванторних логічних лінійних рівнянь, що може сприяти поліпшенню ефективності та універсальності запропонованої методики у розв'язанні задач оброблення даних.

Висновки

У роботі проаналізовано формальні способи інтелектуальних систем: способи подання знань залежно від конкретних галузей застосування систем; формальні мови, що дозволяють подавати знання в пам'яті комп'ютера. Розглянуто сфери впровадження алгебраїчних методів в автоматизованих системах. Встановлено принципи застосування абстрактної алгебри у сферах, пов'язаних з базами даних та розробкою інтелектуальних систем. На основі впровадження алгебраїчних методів розроблено метод використання лінійно-логічних операторів і логічних рівнянь з метою видобування інформації.

Список літератури

1. Ahmad A. Y. A. B., Kumari D. K., Shukla A., Deepak A., Chandnani M., Pundir S., Shrivastava A. Framework for Cloud Based Document Management System with Institutional Schema of Database. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 3s. P. 672–678. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3853> (дата звернення: 12.03.2024).

Показано перспективність упровадження запропонованого методу використання логічних рівнянь в інформаційних системах, зокрема в базах даних. Він забезпечує можливість отримання не тільки інформації, що безпосередньо зберігається в базі даних, але й похідної інформації, отриманої на основі базисної. Задача отримання похідної інформації безпосередньо пов'язана із задачею результату в інтелектуальних системах, водночас у разі застосування алгебраїчного підходу до опису похідної інформації виокремлюється певна алгебраїчна система – алгебра запитів, у термінах якої похідна інформація записується через базисну.

Для того щоб довільний запит можна було виражати яким-небудь видом через базисні запити, на множини запитів додаються алгебраїчні операції, що дозволяють оперувати із запитами. Аналогічно подібні алгебраїчні операції мають додаватися й на множини відповідей. У цьому разі способами наявних алгебраїчних операцій відповідь на довільний запит можна обчислити відповідно до структури запиту, записати його через запити, відповіді на які вже відомі. Розглянуті в роботі множини запитів і відповідей є алгебрами запитів і відповідей.

Застосування алгебраїчних структур значно спрощує процес інтеграції різноманітних джерел інформації, даючи змогу ефективніше керувати складною інформацією. Це сприяє підвищенню якості інформаційної взаємодії з базами знань, забезпечує гнучкішу та швидшу відповідь на запити. Крім того, використання алгебраїчного підходу дозволяє формалізувати та оптимізувати процедури оброблення інформації, що особливо актуально для сфер, яким властиві значні обсяги даних або високі вимоги до точності інформаційних запитів. Нарешті, подальший розвиток алгебраїчних методів і моделей в інформаційних системах може сприяти створенню нових поколінь інтелектуальних аналітичних систем, здатних на глибоке розуміння та оброблення інформації, що відкриває нові перспективи для досліджень у цій галузі.

2. Yang X., Guan X., Pang Z., Kui X., Wu H. GridMesa: A NoSQL-based big spatial data management system with an adaptive grid approximation model. *Future Generation Computer Systems*. 2024. Vol. 155. P. 324–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.02.010>
3. Taipalus T. Vector database management systems: Fundamental concepts, use-cases, and current challenges. *Cognitive Systems Research*. 2024. Vol. 85. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2024.101216>
4. Davydovskiy M. Storing of Lua tables in relational databases. *AIP Conference Proceedings*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0132449>
5. Aishwarya V. A Prompt Engineering Approach for Structured Data Extraction from Unstructured Text Using Conversational LLMs. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2023. P. 183–189. DOI: <https://doi.org/10.1145/3639631.3639663>
6. Aebeloe C., Montoya G., Hose K. Optimizing SPARQL queries over decentralized knowledge graphs. *Semantic Web*. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 1121–1165. DOI: <https://doi.org/10.3233/SW-233438>
7. Braun C. H. J., Käfer T. Quantifiable integrity for Linked Data on the web. *Semantic Web*. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 1167–1207. DOI: <https://doi.org/10.3233/SW-233409>
8. Faltín T., Trigonakis V., Berdai A., Fusco L., Iorgulescu C., Lee J., Yaghob J., Hong S., Chafi H. Distributed Asynchronous Regular Path Queries (RPQs) on Graphs. *Middleware Industrial Track 2023 – Proceedings of the 2023 24th International Middleware Conference Industrial Track, Part of: Middleware 2023*. 2023. P. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1145/3626562.3626833>
9. Iglesias-Molina A., Toledo J., Corcho O., Chaves-Fraga D. Re-Construction Impact on Metadata Representation Models. *K-CAP 2023 – Proceedings of the 12th Knowledge Capture Conference 2023*. 2023. P. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.1145/3587259.3627554>
10. Zykin S.V. Testing Dependencies and Inference Rules in Databases. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2023. Vol. 57, No. 7. P. 788–802. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411623070179>
11. Sathesh A., Kumar A. An Object-Oriented Database Design for Effective Classification. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2022. Vol. 10, No. 4. P. 111–119. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/2204> (дата звернення: 12.03.2024).
12. Figallo M., Monica-Gomes C. The Subalgebra Lattice of a Finite Diagonal-Free Two-Dimensional Cylindric Algebra. *Computación y Sistemas*. 2023. Vol. 27, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.13053/cys-27-1-4544>
13. Yang T., Wang Y., Sha L., Engelbrecht, J. Knowledgebra: An Algebraic Learning Framework for Knowledge Graph. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 432–445. DOI: <https://doi.org/10.3390/make4020019>
14. Gilray T., Kumar S. Distributed Relational Algebra at Scale. *2019 IEEE 26th International Conference on High Performance Computing, Data, and Analytics (HiPC)*, Hyderabad, India, 17–20 December 2019. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/hipc.2019.00014>
15. Luo S., Gao Z.J., Gubanov M., Perez L. L. and Jermaine C. Scalable Linear Algebra on a Relational Database System. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2019. Vol. 31, No. 7. P. 1224–1238. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2018.2827988>
16. Shubin I., Kozyriev A., Liashik V., Chetverykov G. Methods of adaptive knowledge testing based on the theory of logical networks. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. P. 1184–1193. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper86.pdf> (дата звернення: 12.03.2024).
17. Harrington J.L. *Relational Database Design and Implementation: Fourth Edition*. Elsevier Inc., 2016. 689 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01537-4>
18. Meijer E., Bierman G. A co-relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*. 2011. Vol. 54, No. 4. P. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.1145/1924421.1924436>

References

1. Ahmad, A.Y. A. B., Kumari, D.K., Shukla, A., Deepak, A., Chandnani, M., Pundir, S., Shrivastava, A. (2024), "Framework for Cloud Based Document Management System with Institutional Schema of Database". *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. No.12(3s), P. 672–678, available at: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3853> (last accessed 12.03.2024).

2. Yang, X., Guan, X., Pang, Z., Kui, X., Wu, H. (2024), "GridMesa: A NoSQL-based big spatial data management system with an adaptive grid approximation model". *Future Generation Computer Systems*. Vol 155, P. 324–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2024.02.010>
3. Taipalus, T. (2024), "Vector database management systems: Fundamental concepts, use-cases, and current challenges". *Cognitive Systems Research*. Vol. 85. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2024.101216>
4. Davydovskiy, M. (2023), "Storing of Lua tables in relational databases". In: *AIP Conference Proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0132449>
5. Aishwarya, V. (2023), "A Prompt Engineering Approach for Structured Data Extraction from Unstructured Text Using Conversational LLMs". In: *ACM International Conference Proceeding Series*. P. 183–189. DOI: <https://doi.org/10.1145/3639631.3639663>
6. Aebeloe, C., Montoya, G., Hose, K. (2023), "Optimizing SPARQL queries over decentralized knowledge graphs". *Semantic Web*. No. 14(6), P. 1121–1165. DOI: <https://doi.org/10.3233/SW-233438>
7. Braun, C. H. J., Käfer, T. (2023), "Quantifiable integrity for Linked Data on the web". *Semantic Web*. No. 14(6), P. 1167–1207. DOI: <https://doi.org/10.3233/SW-233409>
8. Faltín, T., Trigonakis, V., Berdai, A., Fusco, L., Iorgulescu, C., Lee, J., Yaghob, J., Hong, S., Chafi, H. (2023), "Distributed Asynchronous Regular Path Queries (RPQs) on Graphs". In: *Middleware Industrial Track 2023 – Proceedings of the 2023 24th International Middleware Conference Industrial Track, Part of: Middleware 2023*. P. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1145/3626562.3626833>
9. Iglesias-Molina, A., Toledo, J., Corcho, O., Chaves-Fraga, D. (2023), "Re-Construction Impact on Metadata Representation Models". In: *K-CAP 2023 – Proceedings of the 12th Knowledge Capture Conference 2023*. P. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.1145/3587259.3627554>
10. Zykin, S.V. (2023), "Testing Dependencies and Inference Rules in Databases". *Automatic Control and Computer Sciences*. 57(7), P. 788–802. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0146411623070179>
11. Satheesh, A., Kumar, A. (2022), "An Object-Oriented Database Design for Effective Classification". *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. No.10(4), P. 111–119, available at: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/2204> (last accessed 12.03.2024).
12. Figallo, M., Monica-Gomes, C. (2023), "The Subalgebra Lattice of a Finite Diagonal-Free Two-Dimensional Cylindric Algebra". *Computación y Sistemas*. No. 27(1). DOI: <https://doi.org/10.13053/cys-27-1-4544>
13. Yang, T., Wang, Y., Sha, L., Engelbrecht, J., Hong, P. (2022), "Knowledgebra: An Algebraic Learning Framework for Knowledge Graph". *Machine Learning and Knowledge Extraction*. No. 4(2), P. 432–445. DOI: <https://doi.org/10.3390/make4020019>
14. Gilray, T., Kumar, S. (2019), "Distributed Relational Algebra at Scale". In: *2019 IEEE 26th International Conference on High Performance Computing, Data, and Analytics (HiPC), 17–20 December 2019, Hyderabad, India*. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/hipc.2019.00014>
15. Luo, S., Gao, Z.J., Gubanov, M., Perez, L.L., Jermaine, C. (2019), "Scalable Linear Algebra on a Relational Database System". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. No. 31(7), P. 1224–1238. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2018.2827988>
16. Shubin, I., Kozyriev, A., Liashik, V., Chetverykov, G. (2021), "Methods of adaptive knowledge testing based on the theory of logical networks". *CEUR Workshop Proceedings*. CEUR-WS. P. 1184–1193, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/paper86.pdf> (last accessed 12.03.2024).
17. Harrington, J.L. (2016), "Relational Database Design and Implementation: Fourth Edition". *Elsevier Inc*. 689 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01537-4>
18. Meijer, E., Bierman, G. (2011), "A co-relational model of data for large shared data banks". *Communications of the ACM*. No. 54(4), P. 49–58. DOI: <https://doi.org/10.1145/1924421.1924436>

Надійшла 15.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Козирев Андрій Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: andrii.kozyriev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6383-5222>

Шубін Ігор Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: igor.shubin@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1073-023X>

Kozyriev Andrii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student at the Software Department, Kharkiv, Ukraine.

Shubin Ihor – PhD (Engineering Sciences), Professor at the Software Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

METHOD OF LINEAL-LOGIC OPERATORS AND LOGICAL EQUATIONS IN INFORMATION EXTRACTION TASKS

Relational and logical methods of knowledge representation play a key role in creating a mathematical basis for information systems. Predicate algebra and predicate operators are among the most effective tools for describing information in detail. These tools make it easy to formulate formalized information, create database queries, and simulate human activity. In the context of the new need for reliable and efficient data selection, a problem arises in deeper analysis. **Subject of the study** is the theory of quantum linear equations based on the algebra of linear predicate operations, the formal apparatus of linear logic operators and methods for solving logical equations in information extraction tasks. **Aim of the study** is a developing of a method for using linear logic operators and logical equations to extract information. This approach can significantly optimize the process of extracting the necessary information, even in huge databases. **Main tasks:** analysis of existing approaches to information extraction; consideration of the theory of linear logic operators; study of methods for reducing logic to an algebraic form; analysis of logical spaces and the algebra of finite predicate actions and the theory of linear logic operators. **The research methods** involve a systematic analysis of the mathematical structure of the algebra of finite predicates and predicate functions to identify the key elements that affect the query formation process. The method of using linear logic operators and logical equations for information extraction is proposed. **The results** of the study showed that the method of using linear logic operators and logical equations is a universal and adaptive tool for working with algebraic data structures. It can be applied in a wide range of information extraction tasks and prove its value as one of the possible methods of information processing. **Conclusion.** The paper investigates formal methods of intelligent systems, in particular, ways of representing knowledge in accordance with the peculiarities of the field of application and the language that allows encoding this knowledge for storage in computer memory. The proposed method can be implemented in the development of language interfaces for automated information access systems, in search engine algorithms, for logical analysis of information in databases and expert systems, as well as in performing tasks related to object recognition and classification.

Keywords: knowledge bases; intelligent systems; algebra of finite predicates; logical operators; quantile linear equations.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Козирев А. Д., Шубін І. Ю. Метод лінійно-логічних операторів та логічних рівнянь у завданнях видобування інформації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.081>

Kozyriev, A., Shubin, I. (2024), "The method of linear-logical operators and logical equations in information extraction tasks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.081>

О. МАТВІЄНКО, С. ЗАКУТНІЙ

НЕЧІТКА ЛОГІКА В ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИКОНАННЯ ПРОЄКТІВ

Метою роботи є прогнозування термінів виконання проєкту та його основних економічних параметрів за допомогою теорії графів та методів нечіткої логіки. **Предмет дослідження** в статті – це метод розрахунку основних властивостей або параметрів проєкту, прогнозування термінів його виконання та можливість врахування форс-мажорних ситуацій. У роботі виконується **завдання** пошуку оптимального плану проєкту створення сайту електронної комерції та розрахунку його основних економічних параметрів. Упроваджуються такі **методи**: теорії мережного планування та управління; нечіткої логіки – для розв’язання задачі нечіткої оптимізації; теорії графів, а саме метод критичного шляху *CPM*, – для прогнозування термінів проєкту. Досягнуто такі **результати**: основні економічні параметри були розраховані для двох варіантів проєкту створення сайту електронної комерції – послідовному, коли команда не має багато розробників для його реалізації (або достатньо ресурсів), і паралельному виконанню робіт, що дозволяє оптимізувати час виконання за допомогою залучення додаткових працівників. Також підраховано вартість обох проєктів, що в подальшому може допомогти менеджерам зробити висновки щодо впровадження того чи іншого варіанта планування окресленого типу проєктів. Для першого проєкту план проведення робіт буде завершено за час, що не перевищує 230 діб, з надійністю 30% або не перевищує 295 діб з надійністю 80%. Для другого проєкту план проведення робіт буде завершено за час, що не перевищує 230 діб, з надійністю 30% або не більше ніж 278 діб з надійністю 70%. **Висновки**. У роботі запропоновано нечітку математичну модель пошуку оптимального плану та розрахунку основних економічних параметрів проєкту створення сайту електронної комерції з нечіткою множиною планів та нечітко визначеною метою. Також подано метод розв’язання цієї задачі. Результати дослідження мають значну цінність для планування проєкту, для вирішення питання про доцільність його початку, для прогнозування ресурсів, що знадобляться в процесі його реалізації. Ці показники є вкрай необхідними для покращення процесів і коректного розподілення робіт, що може допомогти посилити конкурентоспроможність та підвищити прибуток проєкту.

Ключові слова: мережний графік; нечітка мета; критичний шлях; функція належності; тривалість.

Вступ

Для розвитку та процвітання будь-якої компанії вкрай необхідні новітні технологічні інструменти продажу та реклами її продукції або поширення будь-яких послуг. Саме тому створення сайту електронної комерції стає одним із найважливіших завдань для подальшого розвитку компанії. Правильне й доцільне використання ресурсів може призвести до стрімкого покращення ефективності процесів і підвищення прибутку, а також значно посилити конкурентоспроможність. Тому питання пошуку оптимального плану проєкту створення сайту електронної комерції та розрахунку його основних економічних параметрів є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Великі масштаби сучасних розробок вимагають створення систем, що забезпечують можливість оцінювання поточного стану та передбачення подальшого ходу розроблення проєктів. Такі системи,

основані на мережних графіках, називаються *CPM* (*Critical Path Method*) та *PERT* (*Project Evaluation and Review Technique*).

Для управління проєктом необхідна інформація, яка в умовах часових обмежень не є повністю визначеною, а є приблизною, неточною. Наразі для розв’язання задач із нечіткими вихідними даними успішно використовується теорія нечітких множин і нечітка логіка. Вивченню цієї теми присвячено багато наукових робіт.

У дослідженні [1] розглядається метод критичного шляху для планування та моніторингу будівельного проєкту. Використовується апарат *fuzzy* логіки для подолання невизначеності оцінки тривалості робіт проєкту.

У праці [2] описується багатокритеріальна нечітка модель для оцінювання будівельних проєктів.

Використанню методів нечіткої логіки та теорії графів для планування економічних параметрів проєктів на будівництві також присвячені студії [3–5].

Нечітка математична модель управління проєктом побудови яхти та новий метод ранжування

пропонується у статті [7]. Проводиться порівняння запропонованого методу з методом критичного шляху, PERT і моделювання PERT.

У праці [8] пропонується нова модель аналізу нечітких грошових потоків проекту на основі нечіткого планування для прогнозування грошових потоків проекту в різні періоди його життєвого циклу.

У дослідженні [9] використовується табличний процесор *MS Excel* для розв'язання задач мережного планування в управлінні IT-проектами, зокрема в обчислюванні часових параметрів подій та визначенні резервів часу виконання робіт.

Методика моделювання мережі *GERT* і пакет імітаційного моделювання для планування проекту досліджується в роботі [10].

У цій статті пропонується нечітка математична модель і метод прогнозування термінів виконання проекту та його основних економічних параметрів за допомогою теорії графів і методів нечіткої логіки. Нечіткими в цій моделі є множина планів і мета.

Формулювання завдання: у роботі розв'язується задача пошуку оптимального плану проекту створення сайту електронної комерції. Береться до уваги весь комплекс робіт для його імплементації та правильний розподіл цих робіт на критичному шляху проекту, розраховується приблизний термін завершення такого проекту та бюджет, що необхідний для покриття всіх затрат на його реалізацію.

Для розв'язання цієї задачі запроваджено методи теорії мережного планування та управління. Для вирішення задачі нечіткої оптимізації застосовуються методи нечіткої логіки. Для прогнозування термінів проекту використовуються методи теорії графів, а саме метод критичного шляху *CPM*.

Застосування графів для планування проекту

Для того щоб дослідити характеристики проекту, потрібно визначити, як саме він розвиватиметься, яким буде його план і задачі, а також необхідно розуміти послідовність цих задач і можливість їх одночасного виконання для збереження часу та більш швидкої реалізації.

Щоб змоделювати таку послідовність, застосовуватимемо математичний апарат теорії графів, що дозволить розподілити між собою вершини (роботи проекту), дасть змогу графічно зобразити всі зв'язки між такими роботами й за його допомогою можна знайти критичний шлях у графі, що відповідатиме кінцевому терміну виконання робіт.

Розглянемо граф $G = \langle V, E \rangle$, де V – множина вузлів (*vertices*); E – множина ребер (*edges*).

Зазвичай для розв'язання задач планування використовується мережний графік. Мережний графік – це граф без кратних ребер, усі ребра якого є зваженими дугами.

Основою системи мережного планування та керування проектом є мережна модель – це графічне подання плану, що в літературі називається мережним графіком. Мережний графік – це схема, на якій чітко показані всі етапи створення спочатку проміжних продуктів із певною готовністю, а потім – завершення проекту.

Метою використання мережних графіків є розроблення оптимального або досить близького до нього варіанта плану проекту, який забезпечує раціональне узгодження в часі та просторі виконуваних робіт і найкраще застосування ресурсів, а також ефективно управління процесом реалізації цього плану. Унаслідок використання мережних графіків скорочується тривалість проекту, знижується його трудомісткість і собівартість, зростає продуктивність праці.

Кожна окрема робота є ребром (дугою) цього мережного графіка, біля неї позначається її вага, тобто ресурс, необхідний для виконання такої роботи. Це може бути як час, потрібний на її реалізацію, так і кількість якихось значущих матеріалів або коштів.

Довжиною шляху називається сума тривалостей усіх робіт, які цей шлях містить.

Найдовший шлях називається критичним, і він є найважливішим у розгляді задач планування та керування, оскільки завдяки йому будемо визначати тривалість усього проекту. Усі події та роботи, що лежать на цьому шляху, називаються критичними, і будь-яка затримка, що призводить до збільшення часу виконання або зростання витрачених ресурсів для критичної роботи, спричиняє збільшення всього комплексу робіт, а отже, і проекту загалом.

Мережний графік будується на основі таблиці з позначенням тривалості кожної роботи та зв'язку цієї роботи з відповідними початковою та кінцевою подіями.

Для побудови таблиці тривалості робіт необхідно знати час їх виконання (або матеріальні витрати на реалізацію окремої роботи залежності від того, який саме параметр досліджується), а також визначитися з послідовністю цих подій.

Нехай i, j – це номери подій, (i, j) – робота для виконання, де i – її початкова подія, j – кінцева подія, $t(i, j)$ – тривалість роботи (i, j) .

Також введемо інші параметри, пов'язані зі створенням таблиці:

$t_p(i)$ – ранній термін події i , тобто термін, раніше якого ця робота точно не може бути завершена;

$t_n(i)$ – пізній термін події i , тобто термін, коли робота точно буде завершена (цей термін дорівнює різниці між довжиною критичного шляху та довжиною найбільшого шляху, що йде після події i);

$R(i)$ – резерв події, що дорівнює різниці між пізнім та раннім термінами.

Необхідно взяти до уваги, що подальша робота не може бути записана в таблицю, якщо не записані всі попередні роботи.

**Математична модель задачі пошуку
оптимального плану проекту
створення сайту електронної комерції
та розрахунку його основних економічних параметрів**

Розглянемо мережний графік, у якому тривалість роботи (i, j) буде нечітким числом $d_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \rangle$, де a_{ij} – мінімальний час виконання роботи; b_{ij} – час, коли робота точно буде виконана, $b_{ij} = c_{ij}$. Функцію належності нечіткого числа d_{ij} позначатимемо як $\mu_{ij}(u)$, де u – елемент універсальної множини $U = [0; \infty)$. Ця величина показуватиме впевненість у тому, що робота справді буде виконана в період між початковою та кінцевою подіями цієї роботи. Необхідно оцінити з певною мірою впевненості ступінь досягнення вчасного виконання плану, що й буде основною метою.

Задача зводиться до задачі математичного програмування з нечіткою множиною допустимих планів (через те, що ми самі можемо обирати, як саме побудувати весь комплекс робіт від початку до кінця) та нечітко визначеною ціллю.

Множину всіх допустимих планів позначимо як \hat{X} , а універсальну множину, на якій будуть задані всі ці плани, – X . Тоді функцію належності нечіткої множини \hat{X} позначимо $\mu_{\hat{X}}(x)$, де $x \in X$.

Нечітко визначена ціль буде формалізуватися нечіткою множиною \hat{X}_c з функцією належності $\mu_c(x)$, $x \in X$.

Усі плани з пошуку оптимального плану проекту створення сайту електронної комерції та розрахунку його основних економічних параметрів є мережними графіками, заданими на одному й тому самому графі, але всі вони відрізняються між собою тривалістю робіт. У цьому разі час роботи (i, j) позначатимемо як u_{ij} . Для планів із множини пошуку оптимального плану проекту створення сайту електронної комерції та розрахунку його основних економічних параметрів виконуються нерівності $a_{ij} \leq u_{ij} \leq b_{ij}$. Тобто в цьому разі величина u_{ij} визначатиметься як уже більш чітке значення виконання роботи. А отже, впевненість у тому, що робота (i, j) буде виконана за час, що не перевищує u , дорівнюватиме $\mu_{ij}(u)$.

Якщо кількість дуг у розглядуваному графі дорівнює n , то кожному допустимому мережному графіку $x \in \hat{X}$ поставимо у відповідність вектор значень тривалості робіт $u(x)$:

$$u(x) = (u_{i_1, j_1}, \dots, u_{i_n, j_n}), \quad (1)$$

де u_{i_k, j_k} – чітке значення тривалості роботи (i_k, j_k) .

Тоді згідно з формулою (1)

$$\mu_{\hat{X}}(x) = \min_k \mu_{i_k, j_k}(u_{i_k, j_k}).$$

Введемо також інші необхідні позначки:

$t(x)$ – тривалість критичного шляху;

T^{\min} – тривалість критичного шляху в разі, коли тривалість роботи (i_k, j_k) , $k = 1, 2, \dots, n$, дорівнює a_{i_k, j_k} , тобто якщо на критичному шляху всі роботи виконуватимуться за мінімальний прогнозований час.

$$\text{Тоді } u(x^{\min}) = (a_{i_1, j_1}, \dots, a_{i_n, j_n}).$$

T^{\max} – тривалість критичного шляху в ситуації, коли тривалість роботи (i_k, j_k) , $k = 1, 2, \dots, n$, дорівнює b_{i_k, j_k} , тобто якщо на критичному шляху всі роботи виконуватимуться за максимальний прогнозований час.

$$\text{Тоді } u(x^{\max}) = (b_{i_1, j_1}, \dots, b_{i_n, j_n}).$$

За функцію належності $\mu_c(x)$ допустимого плану x нечіткій цілі використовується показник близькості розглядуваного плану до найбільш ефективного, тобто плану x^{\min} , у такому разі

$$\mu_c(x) = \frac{T^{\max} - t(x)}{T^{\max} - T^{\min}}. \quad (2)$$

Розв'язком задачі вважатимемо досягнення мети з визначеною мірою впевненості, водночас зважатимемо на ступінь виконання обмежень цієї задачі, тобто ступінь належності плану множині \hat{X} . У такому разі розв'язком буде перетин нечіткої мети із множиною допустимих планів або ж нечітка множина \hat{D} з функцією належності

$$\mu_{\hat{D}}(x) = \min\{\mu_{\hat{X}}(x), \mu_{\hat{C}}(x)\}. \quad (3)$$

Обиратимемо ту альтернативу, що має максимальний ступінь належності розв'язку, тобто альтернативу x^0 , для якої

$$\mu_{\hat{D}}(x^0) = \max_{x \in X} \mu_{\hat{D}}(x) = \max_{x \in X} \min\{\mu_{\hat{X}}(x), \mu_{\hat{C}}(x)\}. \quad (4)$$

Вибір та обґрунтування методу розв'язання

Для розв'язання задач мережного планування використовують багато методів. Метод критичного шляху (CPM) дає змогу виокремити критичні задачі під час створення проекту та оптимізувати його розклад. Метод діаграм Ганта візуально є проектом у вигляді стовпців, що показують тривалість окремих робіт. Метод програмування проектів (Project Scheduling) передбачає математичне моделювання та оптимізацію проекту з огляду на різноманітні обмеження. Метод PERT є статистичним і впроваджується

для оцінювання часу виконання задач проекту та визначення ймовірностей завершення робіт у заданий термін. Метод Agile є підходом до керування проектом, основаним на гнучкості та ітеративності в процесі розроблення, та ефективний для проектів, що постійно змінюються та розвиваються під час виконання робіт [11–15].

У цій статті впроваджується метод критичного шляху, що є ефективним і зручним для розв'язання задачі пошуку оптимального плану та розрахунку основних економічних параметрів проекту створення сайту електронної комерції з нечіткими вихідними показниками [1].

Результати досліджень

Основним завданням дослідження є пошук основних економічних параметрів проекту зі створення Backend-частини сайту електронної комерції (припускається, що сайт буде створено за допомогою однієї з платформ електронної комерції – SAP Commerce / Magento). Тож, по-перше, необхідно визначитися з тим, які роботи мають бути виконані для досягнення мети, а потім завдяки послідовності робіт побудувати граф.

Весь список робіт графа подано в табл. 1.

Таблиця 1. Інформація про кількість робіт і логічні зв'язки між ними

№	Назва роботи	Попередні роботи
1	Підбір команди розробників та аналітиків	–
2	Створення плану робіт та аналіз бізнес-вимог	–
3	Вибір інструментів розроблення та основних фреймворків	1
4	Розгортання програмного середовища для подальшого розроблення та тестування	3
5	Побудова архітектури	1, 2
6	Створення DB-моделі даних та аналіз зв'язків між таблицями	5
7	Налаштування сервера для швидкого пошуку продуктів, індексація даних	5
8	Створення каталогу продуктів, призначення цін, категоризація	6
9	Створення основної сторінки сайту	6
10	Створення сторінки для подання деталей продукту	8
11	Створення сторінки для подання категорій продуктів, налаштування пагінації	7, 8
12	Створення медіаданих та налаштування CDN	8
13	Створення акаунту користувача	9, 10
14	Налаштування Security, авторизація та автентифікація, створення сесій	13
15	Налаштування інтернаціоналізації / локалізації	9, 10
16	Створення кошика продуктів	14
17	Створення механізму для розрахунку остаточних цін та застосування можливих акцій та дисконтів	14
18	Під'єднання Payment-системи	17
19	SEO-налаштування	15
20	Створення admin-сторінки	12, 16, 19
21	Створення Unit та інтеграційних тестів	11, 18, 20
22	Розгортання кінцевого продукту на Production-середовищі	21

Однією з найважливіших характеристик проекту є час його виконання, але заздалегідь неможливо його точно спрогнозувати, тож для планування застосовуються методи нечіткої логіки.

Можна використовувати різні підходи до того, як саме інтерпретувати результат. Наприклад, оцінити можливість виконання проекту з чітко визначеним терміном його завершення (припустимо за рік) або оцінити час, необхідний для завершення роботи над проектом з певною мірою впевненості. Саме цей критерій є одним з найбільш поширених і використовується для прийняття рішення про початок роботи над проектом або відмови від його реалізації [2–5].

За допомогою інформації, поданої в табл. 1, створимо мережний графік проекту (рис. 1).

Також необхідно задати тривалість робіт, тобто визначити нечіткі числа для кожної роботи $d_{ij} = \langle a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \rangle$, де a_{ij} – мінімальний час виконання роботи; b_{ij} – час, коли робота точно буде виконана, $b_{ij} = c_{ij}$. Функція належності $\mu_{ij}(u)$ цього нечіткого числа буде показувати впевненість, що робота справді буде виконана в період між початковою та кінцевою подіями цієї роботи. Показники щодо тривалості робіт зведені в табл. 2.

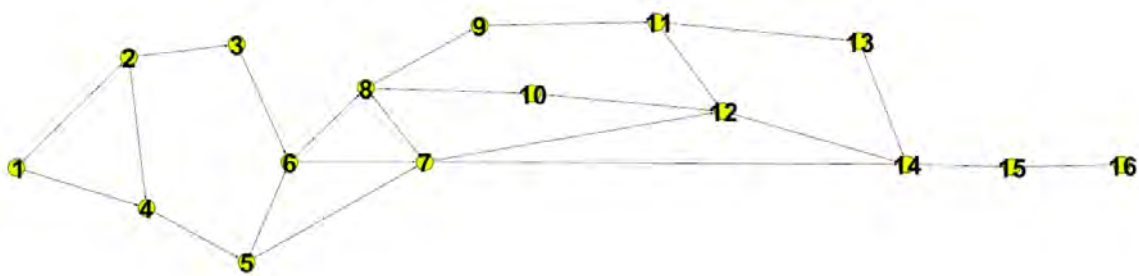


Рис. 1. Мережний графік проекту

Таблиця 2. Показники щодо тривалості робіт над проектом

№	Назва роботи	Позначка роботи (i, j)	Тривалість	
			мінімальний час, днів	максимальний час, днів
1	Підбір команди розробників та аналітиків	(1, 2)	30	60
2	Створення плану робіт і аналіз бізнес-вимог	(1, 4)	14	30
3	Вибір інструментів розроблення та основних фреймворків	(2, 3)	3	7
4	Розгортання програмного середовища для подальшого розроблення та тестування	(3, 6)	7	14
5	Побудова архітектури	(4, 5)	14	21
6	Створення DB-моделі даних і аналіз зв'язків між таблицями	(5, 6)	5	10
7	Налаштування сервера для швидкого пошуку продуктів, індексація даних	(5, 7)	7	15
8	Створення каталогу продуктів, призначення цін, категоризація	(6, 7)	14	21
9	Створення основної сторінки сайту	(6, 8)	15	30
10	Створення сторінки для подання деталей продукту	(7, 8)	10	20
11	Створення сторінки для подання категорій продуктів, налаштування пагінації	(7, 14)	10	20
12	Створення медіаданих і налаштування CDN	(7, 12)	20	30
13	Створення акаунту користувача	(8, 9)	7	14
14	Налаштування Security, авторизація та автентифікація, створення сесій	(9, 11)	21	30
15	Налаштування інтернаціоналізації/локалізації	(8, 10)	14	21
16	Створення кошика продуктів	(11, 12)	7	10
17	Створення механізму для розрахунку остаточних цін та застосування можливих акцій та дисконтів	(11, 13)	21	30
18	Під'єднання Payment-системи	(13, 14)	30	45
19	SEO-налаштування	(10, 12)	7	21
20	Створення admin-сторінки	(12, 14)	30	60
21	Створення Unit та інтеграційних тестів	(14, 15)	30	60
22	Розгортання кінцевого продукту на Production-середовищі	(15, 16)	7	10
Разом			323	579

Розв'язком задачі буде перетин множини допустимих планів і множини нечіткої цілі. Допустимим планом буде мережний графік, побудований із конкретним коефіцієнтом упевненості. Мінімальне значення такого коефіцієнта впевненості (функції належності допустимих планів) дорівнюватиме нулю й відповідатиме мережному графіку з мінімальними можливими тривалостями робіт, тобто це найкращий, але найменш імовірний сценарій. Максимальне ж значення функції належності дорівнюватиме 1 та відповідатиме графіку з максимальними тривалостями робіт, тобто коли точно будемо впевнені, що роботи будуть виконані. Основною задачею буде пошук такого значення функції належності в діапазоні від 0 до 1, що відповідало б максимальному значенню перетину функції належності допустимих планів і нечіткої мети.

Функція належності нечіткої мети (2) показуватиме наближення до найкращого з можливих планів, тобто найкоротшого, але й найменш імовірного.

Оскільки значення функції належності варіюються в діапазоні від 0 до 1, то будемо рухатися з кроком 0,1 і знаходити тривалість критичного шляху на кожному кроці та значення нечіткої мети.

Наведемо алгоритм розв'язання задачі.

1. Візьмемо $\mu_{\hat{x}} = 0$. Побудуємо мережний графік та позначимо вагу кожного ребра відповідно до показників із табл. 2.

2. За допомогою функції *dag_longest_path* бібліотеки *networkx* знайдемо критичний шлях. Обчислимо T^{\min} , T^{\max} , $\mu_c(x)$, $\mu_D(x)$. Перейдемо до наступної ітерації (п. 3).

3. Збільшуємо на 0.1 функцію належності $\mu_{\hat{x}}$. Переобчислимо ваги ребер (тривалості робіт) за формулою $(T_i^{\max} - T_i^{\min}) \cdot \mu_{\hat{x}} + T_i^{\min}$.

Переходимо до п. 2.

4. Остання ітерація розраховується для $\mu_{\hat{x}} = 1$.

На рис. 2 та рис. 3 зображено мережні графіки з вагами ребер, що відповідають тривалостям робіт для першої та другої ітерації.

У такий спосіб продовжуємо ітераційний процес у діапазоні $\mu_{\hat{x}}$ від 0 до 1 із кроком 0,1. Загалом буде виконано 11 ітерацій. Показники щодо коефіцієнтів та довжини критичного шляху на кожній ітерації зведені в табл. 3.

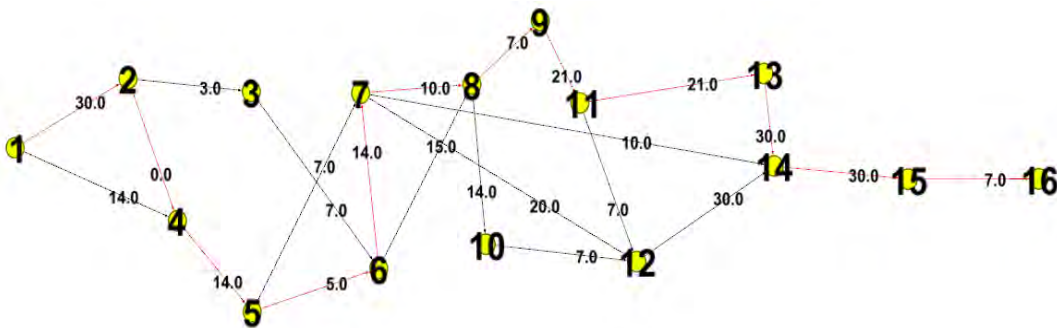


Рис. 2. Мережний графік із тривалостями робіт за умови $\mu_{\hat{x}} = 0$

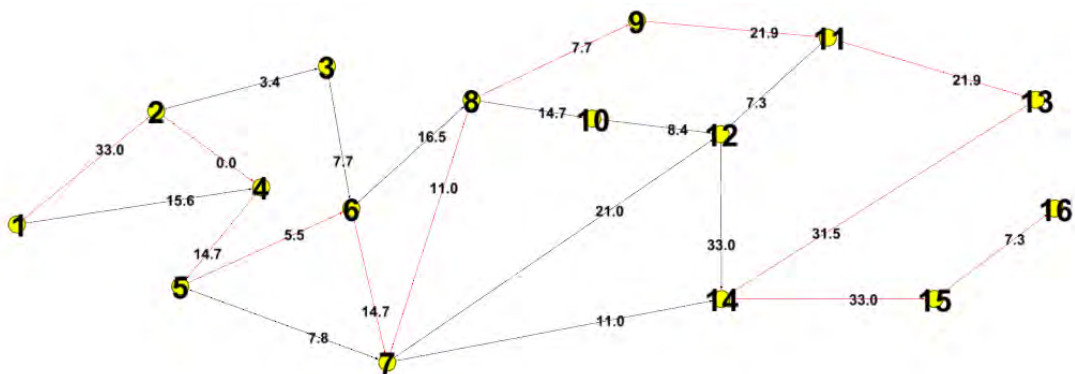


Рис. 3. Мережний графік із тривалостями робіт за умови $\mu_{\hat{x}} = 0,1$

Таблиця 3. Результати ітераційного процесу

№	k	μ_x	Тривалість критичного шляху	μ_c	μ_D
1	0	0,0	189	1,0	0,0
2	1	0,1	202,2	0,9	0,1
3	2	0,2	215,4	0,8	0,2
4	3	0,3	228,6	0,7	0,3
5	4	0,4	241,8	0,6	0,4
6	5	0,5	255	0,5	0,5
7	6	0,6	268,2	0,4	0,4
8	7	0,7	281,4	0,3	0,3
9	8	0,8	294,6	0,2	0,2
10	9	0,9	307,8	0,1	0,1
11	10	1,0	321	0,0	0,0

Відповідно до табл. 3 максимум функції належності нечіткого розв'язку досягається на шостій ітерації, якщо $\mu_x = 0,5$. Тому оптимальним і найбільш вірогідним для початку проекту буде план, коли проект триватиме 255 днів.

Можна по-різному інтерпретувати досягнуті результати залежно від того, яка саме задача стоїть перед менеджером. Наприклад, якщо необхідно визначити вірогідність (або максимальне значення надійності), за умови якої план проведення робіт проекту буде завершено за час, що не перевищує 230 днів, тоді згідно із табл. 3 така надійність дорівнюватиме близько 0,3 (або 30%). Або ж, навпаки, якщо необхідно встановити, скільки днів потрібно витратити, щоб досягти надійності 0,8 (або 80%), тоді з табл. 3 бачимо, що це значення становитиме 295 днів.

Таблиця 4. Інформація про кількість робіт та логічні зв'язки між ними

№	Назва роботи	Попередні роботи
1	Підбір команди розробників та аналітиків	–
2	Створення плану робіт і аналіз бізнес-вимог	–
3	Вибір інструментів розроблення та основних фреймворків	–
4	Розгортання програмного середовища для подальшого розроблення та тестування	1
5	Побудова архітектури	1
6	Створення DB-моделі даних і аналіз зв'язків між таблицями	2, 5
7	Налаштування сервера для швидкого пошуку продуктів	1
8	Створення каталогу продуктів, призначення цін, категоризація	6
9	Створення основної сторінки сайту	3, 4, 5, 6
10	Створення сторінки для подання деталей продукту	3, 4, 5, 6
11	Створення сторінки для подання категорій продуктів, налаштування пагінації	3, 4, 5, 7, 8
12	Створення медіаданих і налаштування CDN	8
13	Створення акаунту користувача	3, 4, 5, 6
14	Налаштування Security, авторизація та автентифікація, створення сесій	13
15	Створення кошика продуктів	8, 10
16	Налаштування інтернаціоналізації/локалізації	9, 10, 11, 13
17	Створення механізму для розрахунку остаточних цін та застосування можливих акцій та дисконтів	15
18	Під'єднання Payment-системи	15
19	SEO-налаштування	16
20	Створення admin-сторінки	14, 17, 18
21	Створення Unit та інтеграційних тестів	12, 18, 19, 20
22	Створення документації	12, 18, 19, 20
23	Виявлення та усунення потенційних ризиків	12, 18, 19, 20
24	Розгортання кінцевого продукту на Production-середовищі	21, 22, 23
25	Оптимізація продуктивності Production-середовища	24

Обчислення

економічних характеристик мережного графіка для модифікованого проєкту створення Backend-частини сайту електронної комерції

Для порівняння результатів спробуємо модифікувати наш минулий проєкт і перебудуємо граф трохи іншим чином, зважаючи, що більшість робіт можуть бути виконані паралельно. Це значно збільшує кількість фіктивних робіт (для подальшого зв'язку робіт між собою), тож змінює саму структуру графа. Також були додані декілька робіт для більшої деталізації завдань, що виконуються протягом усього проєкту. Список усіх робіт додано до табл. 4.

Порівняно з таблицею для минулого проекту можна зазначити, що зросла кількість робіт (вершин), до графа додалися задача з оптимізації продуктивності *Production*-середовища, створення документації та виявлення й усунення потенційних ризиків. Також значно зросла кількість попередніх робіт, що виконуються перед певними роботами. Це зроблено для того, щоб максимально деталізувати

та правильно описати процес створення сайту електронної комерції. Необхідно також зауважити, що кількість фіктивних робіт зросла з 1 до 14, якщо порівнювати з минулим проектом. Показники щодо тривалості робіт для цього графа наведені в табл. 5.

Алгоритм розв'язання задачі аналогічний попередньому прикладу. На рис. 4 зображено граф з усіма фіктивними та дійсними роботами.

Таблиця 5. Показники щодо тривалості робіт над проектом

№	Назва роботи	Позначка роботи (i, j)	Тривалість	
			мінімальний час, дб	максимальний час, дб
1	Підбір команди розробників та аналітиків	(1, 4)	30	60
2	Створення плану робіт і аналіз бізнес-вимог	(1, 2)	22	30
3	Вибір інструментів розроблення та основних фреймворків	(1, 3)	3	7
4	Розгортання програмного середовища для подальшого розроблення та тестування	(4, 10)	7	14
5	Побудова архітектури	(4, 5)	14	21
6	Створення DB-моделі даних і аналіз зв'язків між таблицями	(2, 6)	5	10
7	Налаштування сервера для швидкого пошуку продуктів	(4, 7)	7	15
8	Створення каталогу продуктів, призначення цін, категоризація	(6, 8)	14	21
9	Створення основної сторінки сайту	(6, 9)	15	30
10	Створення сторінки для подання деталей продукту	(6, 11)	15	20
11	Створення сторінки для подання категорій продуктів, налаштування пагінації	(8, 12)	15	20
12	Створення медіаданих і налаштування CDN	(8, 13)	15	30
13	Створення акаунту користувача	(6, 14)	7	14
14	Налаштування Security, авторизація та автентифікація, створення сесій	(14, 15)	21	30
15	Створення кошика продуктів	(8, 16)	8	10
16	Налаштування інтернаціоналізації/локалізації	(12, 17)	14	21
17	Створення механізму для розрахунку остаточних цін і застосування можливих акцій та дисконтів	(16, 18)	8	12
18	Під'єднання Payment-системи	(16, 19)	15	45
19	SEO-налаштування	(17, 20)	7	30
20	Створення admin-сторінки	(18, 21)	40	60
21	Створення Unit та інтеграційних тестів	(20, 22)	45	60
22	Створення документації	(20, 23)	45	50
23	Виявлення та усунення потенційних ризиків	(20, 24)	25	40
24	Розгортання кінцевого продукту на Production-середовищі	(24, 25)	7	10
25	Оптимізація продуктивності Production-середовища	(25, 26)	14	18
Разом			375	678

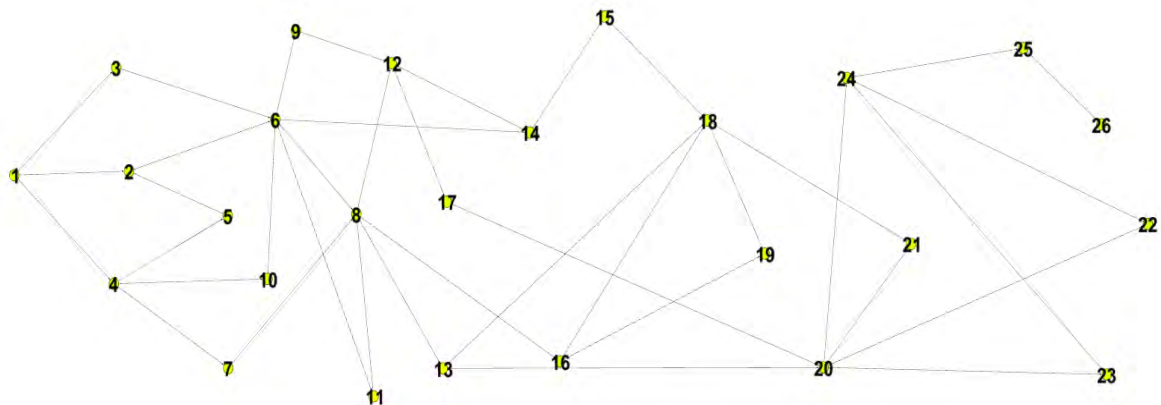


Рис. 4. Мережний графік проекту

Мережні графіки для шостої ітерації зображено на рис. 5.

Результати ітераційного процесу зведено в табл. 6.

Аналізуючи досягнуті результати, зазначимо, що максимум функції належності μ_D для модифікованого проекту створення сайту електронної комерції досягається на шостій ітерації, якщо $\mu_{\hat{x}} = 0,5$.

У цьому разі оптимальним коефіцієнтом надійності залишився той самий показник (тобто приблизно середнє значення тривалості проекту між мінімальним і максимальним значенням). Тож оптимальним є план із надійністю 50% та тривалістю 253,5 діб. Він відповідає тій ітерації, за умови якої може бути два можливих критичних шляхи.

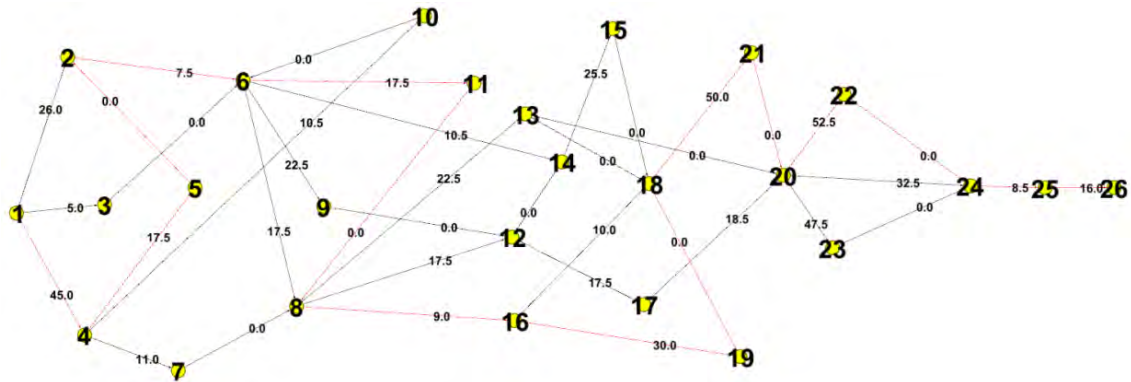


Рис. 5. Мережний графік проекту на шостій ітерації

Таблиця 6. Результати ітераційного процесу

№	k	$\mu_{\hat{x}}$	Тривалість критичного шляху	$\mu_{\hat{c}}$	μ_D
1	0	0,0	193	1,0	0,0
2	1	0,1	205,1	0,901	0,1
3	2	0,2	217,2	0,802	0,2
4	3	0,3	229,3	0,702	0,3
5	4	0,4	241,4	0,603	0,4
6	5	0,5	253,5	0,504	0,5
7	6	0,6	265,8	0,403	0,403
8	7	0,7	278,1	0,302	0,302
9	8	0,8	290,4	0,202	0,202
10	9	0,9	302,7	0,101	0,101
11	10	1,0	315	0,0	0,0

Аналізуючи значення надійності, як і в разі з першим проектом, можна стверджувати, що коли стоїть задача розрахувати надійність проекту з упевненістю 70%, тоді проєкт буде завершено не менше, ніж за 278 діб. І навпаки, якщо задача полягає в обчисленні впевненості в тому, що проєкт буде завершено за 230 діб, тоді надійність дорівнюватиме приблизно 30%.

Розрахунок та порівняння вартості проєктів

Одним із найважливіших економічних параметрів для планування та прийняття рішення про початок проєкту є не тільки час його виконання, але і його вартість. Цей параметр є одним із ключових для менеджерів, а отже, йому справді варто

приділити особливу увагу для успішного кінцевого результату та правильного розподілу ресурсів.

Але для того, щоб правильно розрахувати вартість та кошторис усього проєкту, необхідно, крім часу, знати також і кількість працівників, що будуть залучені до його реалізації. Цей параметр доречно обрати відповідно до кількості робіт, що можуть бути виконані одночасно для зменшення затримань між роботами.

Для визначення кількості робіт, що можуть бути виконані одночасно, використовуємо мережні графіки обох проєктів, що зображені на рис. 1 для першого проєкту та рис. 4 для другого проєкту. Це дасть змогу бачити не тільки кількість інцидентних ребер тої чи іншої вершини, але й тривалість роботи, щоб розрізняти фіктивні та дійсні роботи між собою.

Фіктивними роботами можна нехтувати, оскільки їх тривалість є нульовою. Для перевірки також можна використовувати табл. 1 і табл. 4, щоб точно розуміти послідовність робіт між собою.

Після аналізу мережних графіків зробимо висновок, що для першого проекту максимальна кількість робіт, що можуть бути виконані одночасно, дорівнює чотирьом. Вони можуть бути подані у вигляді масивів. Один масив відповідатиме номерам робіт, що можуть виконуватися одночасно. Відповідно до графіка таких масивів буде два – це роботи 9, 10, 11, 12, а також 11, 12, 13 і 15. У такому разі можемо підсумувати, що для вчасного виконання завдань необхідні як мінімум четверо розробників.

Для другого проекту максимальна кількість одночасних робіт дорівнюватиме п'ятьом роботам. Через те, що цей графік є більш розгалуженим, тож і кількість масивів буде більшою – 2, 3, 4, 5, 7; 9, 11, 12, 13, 15; 11, 12, 14, 17, 18. У цьому разі необхідно залучити п'ятеро розробників.

Навіть якщо намагатися йти за принципом мінімізації витрат і збереження ресурсів, для успішної роботи всієї команди проекту необхідні бізнес-аналітик, прожект-менеджер, *DevOps*-інженер і тестувальники. Однозначної відповіді, яку кількість тестувальників потрібно наймати залежно від розміру команди та кількості розробників, немає, але в середньому ця кількість коливається в межах 50%. Тож нехай для першого проекту буде залучено двоє тестувальників (*Junior* та *Senior*), а для третього – троє (*Junior*, *Middle* та *Senior*).

З метою швидшого виконання роботи над проектом та з огляду на можливі форс-мажорні ситуації можна збільшувати кількість персоналу. Тож зміна цих показників залишатиметься на розсуд клієнта або засновника проекту.

Для комплектування команди розробників першого проекту необхідний, по-перше, фахівець *Team Lead*, який виконуватиме більш управлінську діяльність та вирішуватиме архітектурні питання, іншими трьома розробниками будуть фахівці *Senior*, *Middle* та *Junior*. У другому ж проекті можна додатково найняти ще одного інженера рівня *Middle* для більш усередненого вибору, але ще раз необхідно наголосити, що цей вибір залишається на розсуд засновника.

Інформацію про зарплати можемо взяти на одному з найвідоміших українських сайтів про ІТ – *dou.ua*. Результати щодо оптимальних планів, отримані в попередніх пунктах, містять

показники про тривалість усього проекту, а отже, можна буде поррахувати кількість коштів, що необхідно витратити на утримання зазначеної команди фахівців. Інші витрати, такі як інтеграція з іншими сервісами та плата за ту чи іншу *Ecommerce*-платформу, брати до уваги не будемо, оскільки ці параметри є дуже специфічними та залежать лише від вимог керівництва.

Показники про середні зарплати фахівців, що будуть залучені для реалізації проектів станом на червень 2023 р., подані в табл. 7.

Таблиця 7. Значення середніх місячних зарплат фахівців проекту

Назва роботи	Середня зарплата, \$ (USD)
Team Lead	5500
Senior Software Engineer	5125
Middle Software Engineer	2500
Junior Software Engineer	1000
DevOps	3300
Project Manager	1600
Business Analyst	2200
Junior QA	800
Middle QA	1700
Senior QA	3313

Для аналізу обрані розробники за спеціалізацією *Java* та *Ecommerce*, бо більшість *Ecommerce*-платформ написані саме мовою *Java*.

Відповідно до показників, наведених у табл. 7, можемо стверджувати, що середня місячна вартість утримання команди фахівців для першого проекту становитиме 25 338 \$. До команди другого проекту буде додано ще одного *Middle Software Engineer* та *Middle QA*, тож середня вартість зросте на 4 200 \$ й дорівнюватиме 29 538 \$.

Вартості мінімального можливого (залежно від часу виконання), оптимального й максимального планів подано в табл. 8.

З огляду на табл. 8 мінімальна тривалість проекту становитиме 189 діб. Різниця у вартості між мінімальними планами дорівнюватиме 41 452,55 \$, між оптимальними планами – 46 668,09 \$, а максимальними – 53 226,27 \$. Але якщо зважати на різницю між цими проектами, тоді, як зазначалося вище, другий проект має на три роботи більше (№ 22, 23 і 25 у другому проекті), а саме на 52 доби за мінімальної надійності. У такому разі різниця становила б 18 437,41 \$. У найбільш вірогідній ситуації – 60 795 \$. Тож економія коштів за умови правильного планування є достатньо значною, особливо якщо проект тривалий.

Таблиця 8. Порівняння економічних характеристик проєктів

Назва проєкту	План		Вартість усього проєкту
	назва плану	тривалість, діб	
Створення <i>Backend</i> -частини сайту електронної комерції з послідовним виконанням робіт	найменш імовірний	189	217 676,97 \$
	оптимальний	255	293 691,15 \$
	найбільш вірогідний	321	369 705,33 \$
Створення <i>Backend</i> -частини сайту електронної комерції з паралельним виконанням робіт	найменш імовірний	193	259 129,52 \$
	оптимальний	253,5	340 359,24 \$
	найбільш вірогідний	315	422 931,60 \$

Висновки

У роботі запропоновано нечітку математичну модель пошуку оптимального плану та розрахунку основних економічних параметрів проєкту створення сайту електронної комерції з нечіткою множиною планів. Також подано метод розв'язання окресленої задачі.

Основні економічні параметри обчислені для двох варіантів проєкту створення сайту електронної комерції – послідовному, коли команда не має багато розробників для його реалізації (або достатньо ресурсів), і паралельному виконанню робіт, що дає змогу оптимізувати час виконання за допомогою залучення додаткових працівників. Також підраховано вартість обох проєктів,

що в подальшому може допомогти менеджерам зробити висновки щодо впровадження того чи іншого варіанта планування такого типу проєктів.

Досягнуті результати дослідження мають значну цінність з метою планування проєкту, вирішення питання про доцільність його початку та прогнозування ресурсів, що знадобляться для його реалізації. Ці показники є вкрай необхідними для покращення процесів і коректного розподілення робіт, що може допомогти посилити конкурентоспроможність і збільшити прибуток проєкту.

Подальші дослідження цієї теми можна спрямувати для використання щодо розв'язання такої задачі інших методів теорії графів, зокрема методу діаграм Ганта, *Project Evaluation and Review Technique (PERT)*, *Agile*-методів (*Scrum* та *Kanban*).

Список літератури

- Mahmoud A.H. Critical Paths in a Fuzzy Construction Project Network. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2019. 10(1). P. 1313–1321. URL: https://www.researchgate.net/publication/336072792_Critical_Paths_in_a_Fuzzy_Construction_Project_Network
- Gajzler M., Zima K. Evaluation of Planned Construction Projects Using Fuzzy Logic. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. 15. P. 641–652. DOI: [10.1007/s40999-017-0177-8](https://doi.org/10.1007/s40999-017-0177-8)
- Plebankiewicz E., Zima K., Wiczorek D. Modelling of Time, Cost and Risk of Construction with Using Fuzzy Logic. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2021. 27(6). P. 412–426. DOI: [10.3846/jcem.2021.15255](https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15255)
- Haghighi M. H., Ashrafi M., Nazerfard E. A Novel Fuzzy Bayesian Network-Based Approach for the Project Time-Cost-Quality Trade-off Problem. *AUT Journal of Modeling and Simulation*. 54(2). 2022. P. 185–196. DOI: [10.22060/miscj.2023.20752.5266](https://doi.org/10.22060/miscj.2023.20752.5266)
- Abbass, Huda Fadhil, Al-Kanani, Idean Hassan Proposed Ranking Function to Solve the Fuzzy Project Management and Network Problem. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. DOI: [10.1088/1742-6596/1963/1/012071](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1963/1/012071)
- Ercan Akan, Sibel Bayar. Interval Type-2 Fuzzy Program Evaluation and Review Technique for Project Management in Shipbuilding. *Ships and Offshore Structures*. 2021. P. 1–19. DOI: [10.1080/17445302.2021.1950350](https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1950350)
- Juan Carlos Figueroa-García, Germán Hernández-Pérez, Jennifer Soraya Ramos-Cuesta. Uncertain Project Network Analysis with Fuzzy-PERT and Interval Type-2 Fuzzy Activity Durations. *Heliyon*. 2023. Volume 9. Issue 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14833>
- Mohagheghi V., Meysam S., Mousavi S.M., Vahdani B. Analyzing Project Cash Flow by a New Interval Type-2 Fuzzy Model with an Application to Construction Industry. *Neural Computing and Applications*. 2021. 28. P. 3393–3411. DOI: [10.1007/s00521-016-2235-6](https://doi.org/10.1007/s00521-016-2235-6)
- Родащук Г.Ю., Концеба С.М., Ліщук Р.І., Скуртол С.Д. Мережеве планування в управлінні ІТ-проєктами. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2023. 1. С. 42–56. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2023.1.5>

10. Бушуєв С., Бушуєва В., Засуха І. Застосування стохастичних мереж у проєктах цифровізації державного сектору. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2021. 65. С. 159–172. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2021-2-159-172>
11. Бортульов С.С., Іванов Р.В. Визначення вірогідності реалізації проєкту на основі PERT-методу. *Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем. Матеріали XI міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції 11–12 квітня 2019 р* : Мультимедійне наук. електрон. вид. Братислава – Харків: ВШЕМ – ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2019. URL: <https://mpsesm.org/index.php/mpsesm/mpsesm-xi/paper/view/831>
12. Brewer J.L., Dittman K.C. *Methods of IT Project Management*. West Lafayette. Purdue University Press. 2023. 555 p.
13. Dudnyk O. Sokolovska Z. Application of Fuzzy Expert Systems in IT Project Management. *Project Management – New Trends and Applications*. 2023. 29. DOI: 10.5772/intechopen.102439
14. Aramesh S., Mousavi S.M., Mohagheghi V. A New Comprehensive Project Scheduling, Monitoring, and Management Framework Based on the Critical Chain Under Interval Type-2 Fuzzy Uncertainty. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2021. 18(1). P. 151–170. DOI: [10.22111/IJFS.2021.5880](https://doi.org/10.22111/IJFS.2021.5880)
15. Juan Carlos Figueroa-García, Heriberto Román-Flores, Yurilev Chalco-Cano. Type-Reduction of Interval Type-2 Fuzzy Numbers via the Chebyshev Inequality. *Fuzzy Sets Systems*. 2022. 435 (1). P. 164–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2021.04.014>

References

1. Mahmoud, A. H. (2019), "Critical Paths in a Fuzzy Construction Project Network", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 10(1), P. 1313–1321. available at: https://www.researchgate.net/publication/336072792_Critical_Paths_in_a_Fuzzy_Construction_Project_Network
2. Gajzler, M., Zima, K. (2017), "Evaluation of Planned Construction Projects Using Fuzzy Logic", *International Journal of Civil Engineering*, 15, P. 641–652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0177-8>
3. Plebankiewicz, E., Zima, K., Wiecek, D. (2021), "Modelling of Time, Cost and Risk of Construction with Using Fuzzy Logic", *Journal of Civil Engineering and Management*, 27(6), P. 412–426. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15255>
4. Haghighi, M.H., Ashrafi, M., Nazerfard, E. (2022), "A Novel Fuzzy Bayesian Network-Based Approach for the Project Time-Cost-Quality Trade-off Problem", *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 54(2), P. 185–196. DOI: 10.22060/miscj.2023.20752.5266
5. Abbass, Huda Fadhil, Al-Kanani, Idean Hassan. (2021), "Proposed Ranking Function to Solve the Fuzzy Project Management and Network Problem", *Journal of Physics: Conference Series*. DOI: 10.1088/1742-6596/1963/1/012071
6. Akan, E., Bayar, S. (2021), "Interval Type-2 Fuzzy Program Evaluation and Review Technique for Project Management in Shipbuilding", *Ships and Offshore Structures*, P. 1–19. DOI: [10.1080/17445302.2021.1950350](https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1950350)
7. Figueroa-García, J.C., Hernández-Pérez, G., Ramos-Cuesta, J.S. (2023), "Uncertain Project Network Analysis with Fuzzy-PERT and Interval Type-2 Fuzzy Activity Durations", *Heliyon*, Volume 9, Issue 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14833>
8. Mohagheghi, V., Meysam, S., Mousavi, S.M., Vahdani, B. (2021), "Analyzing Project Cash Flow by a New Interval Type-2 Fuzzy Model with an Application to Construction Industry", *Neural Computing and Applications*, 28, P. 3393–3411. DOI: [10.1007/s00521-016-2235-6](https://doi.org/10.1007/s00521-016-2235-6)
9. Rodashchuk, H.Yu., Kontseba, S.M., Lishchuk, R.I., Skurtol, S.D. (2023). "Network planning in IT project management", *Taurian Scientific Herald. Series: Technical sciences*, (1), 42–56. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2023.1.5>
10. Bushuiev S., Bushuieva V., Zasukha I. (2021). "Application of stochastic networks in public sector digitization projects", *Bulletin of Odessa National Maritime University*, (65), 159–172. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2021-2-159-172>
11. Bortulov Ye.S., Ivanov R.V. (2019), "Determining the probability of project implementation based on the PERT method", *Modern problems of modeling socio-economic systems. Materials of the XI International Scientific and Practical Internet Conference April 11–12, Bratislava – Kharkiv*. available at: <https://mpsesm.org/index.php/mpsesm/mpsesm-xi/paper/view/831>
12. Brewer, J.L., Dittman, K.C. (2023), *Methods of IT Project Management*, West Lafayette. Purdue University Press, 555 p.
13. Dudnyk, O. Sokolovska, Z. (2023), "Application of Fuzzy Expert Systems in IT Project Management", *Project Management – New Trends and Applications*, 29. DOI: 10.5772/intechopen.102439
14. Aramesh, S., Mousavi, S.M., Mohagheghi, V. (2021), "A New Comprehensive Project Scheduling, Monitoring, and Management Framework Based on the Critical Chain Under Interval Type-2 Fuzzy Uncertainty", *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 18 (1), P. 151–170. DOI: [10.22111/IJFS.2021.5880](https://doi.org/10.22111/IJFS.2021.5880)
15. Figueroa-García, J.C., Román-Flores, H., Chalco-Cano, Y. (2022), "Type-Reduction of Interval Type-2 Fuzzy Numbers via the Chebyshev Inequality", *Fuzzy Sets Systems*, 435 (1), P. 164–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2021.04.014>

Відомості про авторів / About the Authors

Матвієнко Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: olha.matviienko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-7616>

Закутній Сергій Валерійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: serhii.zakutnii@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4791-2814>

Matviienko Olha – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

Zakutnii Serhii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate at the Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

FUZZY LOGIC IN THE PROBLEMS OF DETERMINING THE ECONOMIC PARAMETERS OF PROJECT IMPLEMENTATION

The **goal** of this work is to forecast project execution terms and its main economic parameters using graph theory and fuzzy logic methods. The **subject** of research in the article is the method of calculating the main properties or parameters of the project, forecasting the terms of its implementation and the possibility of taking into account force majeure situations. The article discusses the **task** of finding the optimal plan for the project of creating an e-commerce site and calculating its main economic parameters. The work uses **methods** of the theory of network planning and management. Fuzzy logic methods are used to solve the fuzzy optimization problem. Graph theory methods, namely the CPM critical path method, are used to forecast project deadlines. The following **results** were obtained: the main economic parameters were calculated for two versions of the project to create an e-commerce site – sequential, when the team does not have many developers to implement it (or enough resources), and parallel execution of work, which allows you to optimize the execution time by involving additional workers. The cost of both projects was also calculated, which in the future can help managers draw conclusions regarding the implementation of one or another planning option for this type of project. For the first project, the project work plan will be completed in a time not exceeding 230 days, with a reliability of 30%. Or does not exceed 295 days with a reliability of 80% percent. For the second project, the project work plan will be completed in a time not exceeding 230 days, with a reliability of 30%. Or does not exceed 278 days with a reliability of 70% percent. **Conclusions:** the paper proposes a fuzzy mathematical model for finding the optimal plan and calculating the main economic parameters of the project of creating an e-commerce site with a fuzzy set of plans and a vaguely defined goal. The work also presents a method for solving this problem. The obtained results of the research are of great value for planning the project, for solving the question of the feasibility of its initiation, for forecasting the resources that will be needed for its implementation. These indicators are essential for improving processes and correct allocation of work, which can help strengthen competitiveness and increase project profits.

Keywords: network graph; fuzzy goal; critical path; membership function; duration.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Матвієнко О. І., Закутній С. В. Нечітка логіка в задачах визначення економічних параметрів виконання проєктів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.096>

Matviienko, O., Zakutnii, S. (2024), "Fuzzy logic in the problems of determining the economic parameters of project implementation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.096>

Ю. МАЦЕЛЮХ, В. ЛИТВИН

АНАЛІЗ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ВПЛИВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕЦЮ В РОЗУМНОМУ МІСТІ

Стан забруднення атмосфери зумовлений зростанням населення, кількості транспорту та згенерованими обсягами викидів. **Об'єктом дослідження** є процес аналізу пасажирських перевезень у місті. **Предметом** – методи аналізу пасажирських перевезень. **Мета:** аналіз пасажирських перевезень та підходів до оптимізації громадського транспорту на засадах концепції розумного міста. **Завдання:** аналіз пасажирських перевезень, класифікація наявних концептуальних підходів до оптимізації громадського транспорту з низькими викидами вуглецю, систематизація методів, засобів і типів нейронних мереж у розумних містах, дослідження впровадження успішних проектів. **Методи** статистичного аналізу, лінійної та нелінійної інтерполяції, логічного узагальнення, порівняння, групування, аналізу й синтезу. **Результати:** аналіз пасажирських перевезень у місті виявив, що статистичні набори інформації вказують на зниження основних показників пасажиропотоків та зростання обсягів викидів вуглецевовмісних сполук. Класифікація наявних підходів до оптимізації громадського транспорту здійснена за його пріоритетністю, гібридизацією та електризацією транспортних засобів та впровадженням ІТ-моніторингу. Під час систематизації методів і засобів у розумних містах виокремлено: розумні транспортні системи; електричні транспортні засоби; мережі спільного використання транспорту; розумні застосунки та інформаційні системи; інноваційні системи оплати; безпілотні транспортні засоби; інформаційні табло та системи оголошень; мережі велосипедних доріжок і обладнані тротуари; системи екологічного моніторингу. Серед нейронних мереж запропоновано використовувати рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі як ті, що сприяють оптимізації маршруту та передбаченню трафіку. **Висновки.** Статистичний аналіз пасажирських перевезень установив, що зниження викидів діоксиду вуглецю є невіршеним завданням як для громадського транспорту, так системи перевезень. Запропоновано до методів і засобів, що оптимізують громадський транспорт, долучити успішні в усьому світі ініціативи реалізації концепції розумного міста, що зменшують вуглецевий слід. Рекомендовано застосовувати рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі для оптимізації пасажирських перевезень у розумних містах.

Ключові слова: пасажирські перевезення; розумне місто; викиди вуглецю; системний аналіз; методи аналізу.

Вступ

Щороку проблема забруднення довкілля викидами вуглецевовмісних сполук в атмосферу посилюється зі зростанням на планеті населення, кількості транспорту, що здійснює їх транспортування, та обсягів викидів, які ці транспортні засоби генерують. Гострою, а інколи критичною ця проблема є у великих містах з багатомільйонним населенням. Як пасажирський, так і вантажний транспорт є одним із основних джерел викидів парникових газів, що призводить до зміни клімату. Унаслідок цього чимало міст у всьому світі почали впроваджувати заходи щодо скорочення викидів вуглецю. Одним із найефективніших способів зменшення викидів вуглекислого газу в транспортній галузі є впровадження концепції розумного міста, де одним із ключових завдань є зниження обсягів вуглецевовмісних викидів шляхом оптимізації мережі маршрутів пасажирських перевезень. Це обґрунтовує **актуальність** окреслених досліджень.

Ефективність мережі маршрутів пасажирських перевезень з огляду на концепції розумного міста несе позитивні зміни як для багатомільйонних міст, так і для міст обласного та районного рівня з меншою кількістю населення, оскільки позитивно впливає на підвищення ефективності та результативності роботи всіх транспортних мереж у населеному пункті. Загалом, позитивні зміни в роботі громадського транспорту, зокрема коректування маршрутів, їх довжини, збільшення чи зменшення інтервалів між транспортними засобами, зміна графіків роботи тощо, впливають і на обсяги викидів парникових газів, зменшуючи їх. Значну роль у вирішенні цієї проблеми відіграє впровадження нових інформаційних технологій, які, підвищуючи продуктивність роботи транспортної мережі в розумному місті, мають на меті зробити громадський транспорт привабливим для користувачів через скорочення часу перебування в дорозі, покращення якості обслуговування та якості життя населення. Для компаній упровадження сучасних інформаційних технологій робить бізнес

більш прибутковим завдяки збільшенню обсягів перевезень (кількості перевезених пасажирів) і, зрештою, зростання обсягів отриманих прибутків. Водночас із зменшенням викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук транспортні компанії вирішують також соціальні та екологічні проблеми міста. Тому пошук нових теоретичних підходів, методів і засобів аналізу пасажирських перевезень з метою розроблення в майбутньому інноваційних моделей та інструментів оптимізації роботи громадського транспорту має практичний характер і сприяє скороченню викидів вуглецю в розумному місті. Об'єктом досліджень є процес аналізу пасажирських перевезень у розумному місті та його вплив на зменшення вуглецевмісних викидів у атмосферу. Предметом дослідження є засади оптимізації перевезень пасажирів у громадському транспорті для зниження забруднення атмосфери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Учені різноманітних наукових напрямів у всьому світі вже десятиріччями працюють над вирішенням цієї проблеми. Розвитку теоретико-методологічних основ аналізу пасажирських перевезень, побудові сучасних інформаційно-комунікаційних моделей та інструментів оптимізації процесів організації пасажирських перевезень присвячені праці відомих науковців як в Україні, так і за її межами. Серед дослідників, чийі студії спричинили визначні зміни в теоретичних поглядах і практичних підходах до принципів побудови систем аналізу пасажирських перевезень на основі концепції розумного міста, варто згадати таких учених: О. Борейко [1, 2], Ю. Боз [3], М. Бублик [4, 5], С. Бушуєв [6], Н. Ван [7], Т. Ванлі [8], Р. Вольняк [9], А. Гендуєс [10], Ю. Дай [11], І. Йонек-Ковальська [12], Дж. Кім [13], Д. Коштура [14], В. Литвин [15], Ю. Лім [16], Х. Лін [17], Ю. Мацелюх [18], Н. Натх [19], Х. Нгуєн [20], Л. Подлесна [21], З. Спайсер [24], Дж. Тан [25], В. Теслюк [2], А. Шаріфі [22], С. Шіу [23], Ю. Чень [26], З. Чень [27], К. Чен [28].

Ю. Боз і Т. Кай [3] розглядають основні характеристики розумного міста та їх важливість, щоб трансформувати міста до розумних та серед стійких міських послуг відводять ключову роль розумним послугам перевезення пасажирів. На основі зібраної інформації автори стверджують, що міста з населенням, значно нижчим за великі метрополіси,

більш успішно надають послуги з перевезення пасажирів у громадському транспорті, які можна пов'язати з концепцією розумного міста.

Значну роль у розвитку розумних міст відіграють інформаційні технології, які стрімко розвиваються з початком ХХІ ст. Так, О. Борейко, В. Теслюк, С. Бушуєв [1, 2, 6], Т. Ванлі [8] досліджують інструменти та засоби організування пасажирських перевезень у межах концепції розумних міст, де інновації, складність бізнесу, інформаційно-комунікаційна та транспортна інфраструктури є ключовими факторами розумного міста. М. Бублик [4, 5] обґрунтовує шляхи впровадження концепції розумної спеціалізації для трансформування як всієї української економіки загалом, так і транспортної індустрії зокрема, до циркулярної, де джерелом економічних доходів транспортних компаній є не тільки результати їх господарської діяльності, а зниження викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук й перероблення відходів, що несуть загрозу всьому людству.

Н. Ван [6] розглядає підходи до розумного міського планування, де критичною сферою міського розвитку є якість пасажирських перевезень, спрямованих на створення сталого, ефективного та придатного для життя міського середовища. Автори роботи [6] провели комплексний аналіз, визначивши місця зі зниженими викидами вуглекислого газу, оптимізувавши розподіл ресурсів для економічної ефективності та підвищення естетичної привабливості для задоволення громади, а також довели ефективність запропонованого підходу до створення екологічно стійких, економічно й естетично привабливих міських просторів. Р. Вольняк [9], А. Гендуєс [10], І. Йонек-Ковальська [12] вивчають засоби трансформації міст до розумних, де серед основних інструментів ключову роль відіграє розумний транспорт, яким міська влада може ефективно керувати для трансформації та змін у контексті розумних міст, створюючи нові, руйнуючи старі та підтримуючи ефективні інституційні механізми. Ю. Дай [11] досліджує загальну основу процесу трансформації розумного міста та його транспортної системи, описує роль зацікавлених сторін для міст на різних етапах трансформації в напрямі до розумного міста, виокремлює інформаційні та науково-технологічні технології як інструмент залучення стейкхолдерів для трансформації до розумного міста, а також пропонує чотири альтернативні сценарії трансформації до розумного

міста, де розумним пасажирським перевезенням надається значна роль.

Х. Нгуен та співавтори праці [20] досліджують сутність поняття "розумне місто" з підтримкою Інтернет-речей, що охоплює багато різних сфер, таких як розумний транспорт, охорона здоров'я та сільське господарство, де досягнення штучного інтелекту найбільше сприяють зростанню впровадження Інтернет-речей. У статті [20] автори на основі Інтернет-речей також запропонували концепцію розумного міста, передумови його розвитку та його компоненти, де особлива увага зосереджена на вивченні останніх розробок розумних міст із підтримкою Інтернет-речей та проривів за допомогою технологій штучного інтелекту, щоб висвітлити поточний етап, основні тенденції та нерозв'язані проблеми впровадження технологій Інтернет-речей на основі штучного інтелекту для створення розумних міст.

Ю. Чень [26], З. Чень [27], К. Чен [28] обґрунтовують способи підвищення екологічної та економічної ефективності розумного міста, що досягається завдяки впливам технологій, транспортної інфраструктури та збереженню енергії. Автори студій [26–28] вважають розумне місто прискорювачем як для підвищення економічної ефективності, так і для покращення навколишнього середовища завдяки зниженню викидів вуглецевмісних сполук в атмосферу, а також доводять, що ефективність розумного міста залежить від міської транспортної структури та характеристик її складників.

Дж. Тан та інші вчені [25] досліджують механізми взаємодії розумної енергії та їх вплив на викиди вуглецю в розумних містах як єдину та цілісну систему, обґрунтовуючи це кількісними оцінками впливів розумної енергії на вуглецеву емісію в розумному місті. Крім того, науковці запропонували використовувати підхід синтетичної різниці у відмінності та підхід просторової різниці у відмінності в моделях для оцінювання впливів розумної енергії на карбонові викиди в розумному місті та довели значне зниження вуглецевих викидів, беручи до уваги ефекти просторового поширення розумної енергії в межах розумного міста.

У роботі [22] А. Шаріфі зі співавторами встановлюють зв'язки між розумними містами та цілями сталого розвитку, які ще недостатньо вивчені, а також виокремлюють три основні цілі сталого розвитку – ЦСР 6, ЦСР 7 і ЦСР 11 [29], на досягнення яких спрямована трансформація технологій розумного

міста, незважаючи на те, що існує упередженість щодо звітів про переваги розумних міст. Цілі сталого розвитку затверджені протягом останнього двадцятиліття в резолюціях міжнародних конвенцій Генеральної Асамблеї ООН [29], в українських державних Програмах, постановах, указах та Національних доповідях [30–34]. Цілі сталого розвитку, зокрема ЦСР 6, ЦСР 7, ЦСР 11 – ЦСР 13 [29, 33–34] визнають засадничі напрями розвитку суспільства, серед яких визначальними є забезпечення доступу до якісної води та належних санітарних умов, доступності та чистоти енергії, а також сталий розвиток міст і громад, відповідальне споживання та боротьба зі зміною клімату. Відповідно до цього управління пасажирськими перевезеннями в розумних містах покликане створити умови для покращення якості проживання в містах та зменшення викидів в атмосферу вуглецевмісних сполук. Це потребує безпрецедентних зусиль у всіх секторах суспільства, де влада й бізнес мають налагодити партнерські відносини заради досягнення успіху в процесі трансформації до розумних міст, де забезпечено доступ до чистого навколишнього середовища без викидів, скидів і відходів.

В основі інноваційних моделей для зниження обсягів викидів вуглецевмісних сполук у роботах М. Бублик [35–37] розроблено концепцію техносолітону, у якій значна роль відводиться оцінюванню шкоди та збитків у високозабруднювальних секторах економіки для визначення пріоритетів у всіх секторах економіки, соціального розвитку та збереження довкілля. Зниження викидів у атмосферу від транспортної системи має значний вплив на формування циркулярної економіки, покращення якості життя та досягнення цілей сталого розвитку в розумних містах [38].

Визначення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

Узагальнюючи проведені дослідження окресленої проблеми та вивчення наявних методів розвитку пасажирських перевезень у розумних містах, бачимо, що нині нерозв'язаним питанням є пошук ефективних підходів для оптимізації системи організації мереж громадського транспорту, що сприяють зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу для побудови розумних міст. Недостатньо також приділено уваги аналізу пасажирських перевезень у містах і визначенню наявних проблем і упереджень,

що перешкоджають упровадженню концепції розумного міста в його транспортну систему загалом та пасажирські перевезення зокрема. Це вказує на необхідність наукових досліджень в окресленому напрямі, а саме на проведення аналізу пасажирських перевезень у містах і визначення сучасних ефективних підходів щодо покращення організації мереж громадського транспорту, які сприяють зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу для побудови розумних міст, що і є **метою цієї роботи**.

У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців; аналіз та класифікація наявних концептуальних підходів до оптимізації організації мереж громадського транспорту з метою скорочення викидів вуглецю; систематизація методів і засобів, покликаних покращити функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах; вивчення успішних проєктів оптимізації мережі громадського транспорту та визначення наявних проблем та упереджень, що перешкоджають їх упровадженню; дослідження типів різних нейронних мереж, використання яких сприяє оптимізації маршруту та передбачення трафіку на дорозі.

Результати досліджень та їх обговорення

Оптимізація системи організації мереж громадського транспорту загалом позитивно впливає на покращення економічної ефективності та результатів господарської діяльності всіх транспортних мереж у населеному пункті, однак це ще не означає, що саме це сприятиме зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу, досягненню цілей сталого розвитку та розбудові принципів розумних міст. Для дослідження пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців були обрані показники за 2007–2021 рр., зібрані Головним управлінням статистики у Львівській області [39]. За інформацією порталу "Панель міста" [40], перевезення пасажирів транспортом загального користування (пасажироперевезення громадським транспортом) здійснювалися в межах міста в обсягах, наведених на рис. 1. Як видно з графіка (рис. 1), обсяг пасажироперевезень громадським транспортом має спадну тенденцію. На жаль, з 2022 р. такі факти через воєнний стан не досліджуються [41]. Це зумовлено обмеженнями на оприлюднення відкритої інформації під час війни,

відповідно до Закону України "Про державну статистику", з метою забезпечення виконання вимог щодо конфіденційності статистичних відомостей.

Схожа спадна тенденція спостерігається в дослідженні динаміки пасажироперевезень автобусним громадським транспортом (рис. 2; складено авторами за матеріалами [39–41]), тролейбусами (рис. 3; побудовано авторами за матеріалами [39–41]) і трамваями (рис. 4; побудовано авторами за матеріалами [39–41]). За інформацією Головного управління статистики у Львівській області [39], упродовж 2013–2019 рр. спостерігалось зростання обсягів пасажиропотоків у електричному громадському транспорті. Різкий спад пасажирських перевезень 2020 р. зумовлений карантинними обмеженнями під час пандемії COVID-19.

У табл. 1 наведені такі показники: обсяги перевезень пасажирів автомобільним транспортом, загальна кількість автомобільних маршрутів і автомашин на маршрутах, середній вік автомашин, що здійснюють міські пасажирські перевезення, та кількість зупинок автомобільного транспорту. З табл. 1 видно, що останнє оновлення автопарку відбулося 2019 р., ще до початку пандемії COVID-19, тому маємо з кожним наступним роком зростання середнього віку автомашин, що здійснюють пасажирські перевезення, який 2023 р. становив 13 років. Обсяги пасажиропотоків у автомобільному транспорті впродовж 2021–2022 рр. майже відновилися до показників початку пандемії, хоча забезпечується це зростанням інтенсивності перевезень (збільшенням кількості рейсів на маршруті, переповненістю транспорту тощо). Зниження кількості машин на маршрутах 2022 р. було зумовлено виведенням з ладу транспортних засобів унаслідок ворожих обстрілів та використанням їх для евакуації населення із зон проведення інтенсивних бойових дій. Тому було прийнято рішення, що такі змінні показники не доцільно застосовувати для прогнозування пасажиропотоків, оскільки це тільки призведе до недостовірних результатів.

У табл. 2 та 3 наведені основні показники щодо перевезень пасажирів міським електротранспортом, серед яких загальна кількість трамвайних і тролейбусних маршрутів, їх загальна протяжність, загальна кількість трамваїв і тролейбусів на маршрутах, середній вік міських електротранспортних засобів, що здійснюють перевезення, та кількість трамвайних і тролейбусних зупинок.



Рис. 1. Перевезення пасажирів транспортом загального користування (складено авторами за матеріалами [39–41])



Рис. 2. Перевезення пасажирів автомобільним транспортом



Рис. 3. Перевезення пасажирів тролейбусами



Рис. 4. Перевезення пасажирів трамваями

Використовуючи методи лінійної та нелінійної апроксимації на основі показників, поданих у табл. 2 та 3, було інтерпольовано обсяги пасажиропотоків у електротранспорті у Львові до 2025 року (рис. 5). Найвищі показники детермінації ($R^2 = 0,8535$ і $R^2 = 0,6715$) для

пасажирських перевезень тролейбусами й трамваями відповідно мають поліномічні функції 5-го степеня ($y = 1.3494x^5 - 54.833x^4 + 763.97x^3 - 3969x^2 + 4087.3x + 36756$ та $y = 2.8964x^5 - 125.5x^4 + 1882.5x^3 - 11460x^2 + 25166x + 35388$).

Таблиця 1. Основні показники перевезення пасажирів автомобільним транспортом та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів автомобільним транспортом, млн осіб	Загальна кількість автомобільних маршрутів, од.	Загальна кількість автомашин на маршрутах, од.	Середній вік автомашин, що здійснюють міські пасажирські перевезення, роки	Кількість зупинок автомобільного транспорту
2010	145.9	74	840	–	–
2011	141.4	74	840	–	–
2012	134.8	52	607	–	–
2013	115.8	52	620	–	–
2014	125.1	53	620	11.5	661
2015	109.7	55	640	12.5	661
2016	93.3	50	604	9.4	726
2017	90.4	56	642	8.6	803
2018	89.0	56	622	9.3	908
2019	89.8	52	507	8.7	803
2020	50.9	59	498	8.7	765
2021	69.0	51	440	9.7	1057
2022	80.0	67	393	12	773
2023	–	50	426	13	1066

Таблиця 2. Основні показники перевезення пасажирів у трамваях та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів, тис. осіб	Загальна кількість маршрутів	Загальна протяжність маршрутів	Загальна кількість машин на маршрутах, од.	Середній вік машин, що здійснюють перевезення, рік	Загальна кількість зупинок, од.
2010	49603.1	9	102.6	64	26.9	117
2011	36892.2	9	102.6	60	26.6	117
2012	43287.0	8	94.4	62	27.7	117
2013	35935.2	10	116.3	65	28.3	117
2014	50549.3	10	116.3	70	29.1	124
2015	59572.5	10	116.3	65	30.1	124
2016	56555.9	10	134.1	70	29.6	142
2017	54018.6	9	93.0	62	30.7	142
2018	58808.4	9	93.0	75	34	144
2019	63122.5	9	116.2	86	34	136
2020	34711.2	7	81.9	67	33.6	142
2021	36427.7	8	81.9	70	34.5	142
2022	–	7	99.1	70	34.6	133
2023	–	8	81.9	72	34.7	134

Таблиця 3. Основні показники перевезення пасажирів у тролейбусах та їх динаміка (складено авторами за матеріалами [39–41])

Роки	Перевезення пасажирів, тис. осіб	Загальна кількість маршрутів	Загальна протяжність маршрутів	Загальна кількість машин на маршрутах, од.	Середній вік машин, що здійснюють перевезення, рік	Загальна кількість зупинок, од.
2010	25876.4	10	135.9	67	15.1	172
2011	22453.5	10	137.9	58	16.9	177
2012	25012.2	10	142.3	59	17.8	186
2013	22904.5	9	145.8	60	19.2	186
2014	26397.5	10	167.6	60	19.8	186
2015	29518.3	10	168.8	55	20.29	190
2016	31575.2	10	167.9	55	20.5	192
2017	31765.9	9	149.0	52	20.3	192
2018	31220.1	10	149.0	56	24.0	192
2019	36409.5	9	133.4	65	21.0	197
2020	29676.8	11	132.6	60	13.7	199
2021	32555.7	9	132.6	65	13.8	199
2022	–	10	136.0	69	14.9	203
2023	–	10	136.2	69	15.9	204

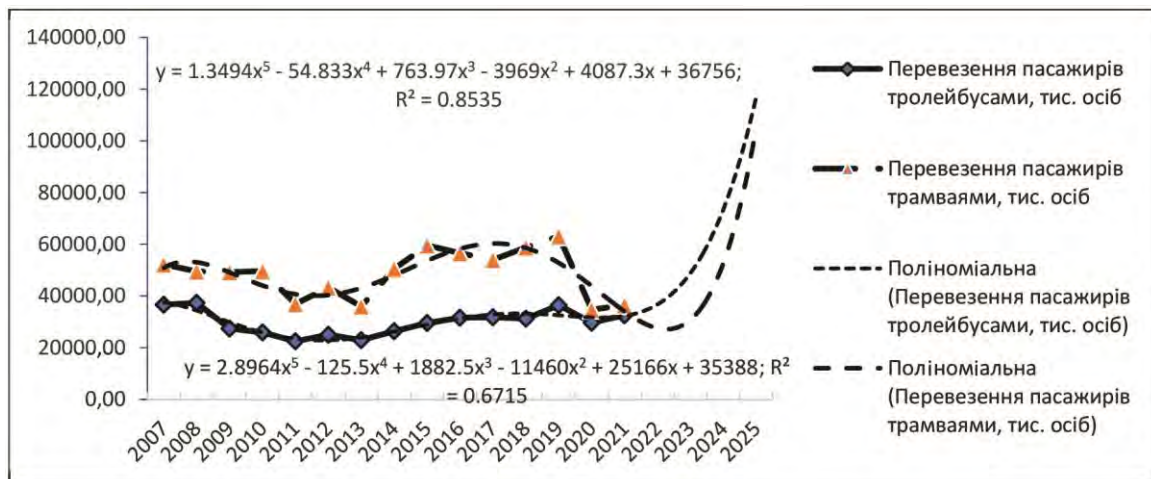


Рис. 5. Динаміка обсягів пасажиропотоків у електротранспорті у Львові та їх обчислені значення до 2025 р. (власні розрахунки)

Обсяги пасажиропотоків у електротранспорті Львова під час пандемії 2021 р. так і не відновили своїх значень до показників її початку (табл. 2 та 3), хоча відбулося зростання кількості транспортних засобів (на маршрутах Львова курсувало на 3 трамваї та 5 тролейбусів більше). Карантинні обмеження таки вплинули на роботу електротранспорту, оскільки пасажиропотік забезпечується не тільки зростанням кількості транспортних засобів, а насамперед збільшенням кількості пасажирів (що проживають в населеному пункті та мають потребу в переміщенні). Незважаючи на оптимістичність здобутих значень пасажиропотоків за отриманими залежностями (досягнення протягом 2023–2024 рр. допандемічного рівня показників для обсягів пасажирських перевезень тролейбусами й трамваями), вони розраховані внаслідок інтерполяції ретроспективної інформації, яка жодним чином не бере до уваги ні зменшення кількості населення міст унаслідок переходу російсько-української війни в повномасштабну фазу інтенсивних бойових дій на третині території держави, ні припинення роботи транспорту під час майже постійних і частих повітряних тривог тощо. Отже, наявні набори показників є неповними й не містять достатньої кількості відомостей про чинники, важливі для прийняття ефективних управлінських рішень.

Аналізуючи наявні набори показників щодо викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел у Львівській області, бачимо, що карантинні обмеження 2020 р. посилили тенденцію до їх зменшення (рис. 6; побудовано авторами за матеріалами [39–42]). Щодо динаміки викидів діоксиду вуглецю пересувними джерелами

у Львівській області маємо дві різні тенденції на двох проміжках – від 2006 до 2015 р. і від 2016 до 2022 р. (рис. 7; побудовано авторами за матеріалами [39–42]), зумовлені зміною методик розрахунку. Так, з 2006 р. в методиці беруться до уваги викиди від автомобільного, залізничного, авіаційного та водного транспортів, куди з 2007 р. ще додали викиди з виробничої техніки (пересувної), та з 2016 р. у методиці беруться до уваги основні відомості про кінцеве використання палива автомобільним транспортом, які збираються з енергетичного балансу всієї України. Оскільки викиди в атмосферне повітря діоксиду вуглецю від пересувних джерел забруднення у Львівській області зросли із незначним збільшенням пасажирських перевезень автобусними транспортними засобами (рис. 7), то необхідно зважати на частку, яку становить громадський транспорт у загальному обсязі спожитого ним палива.

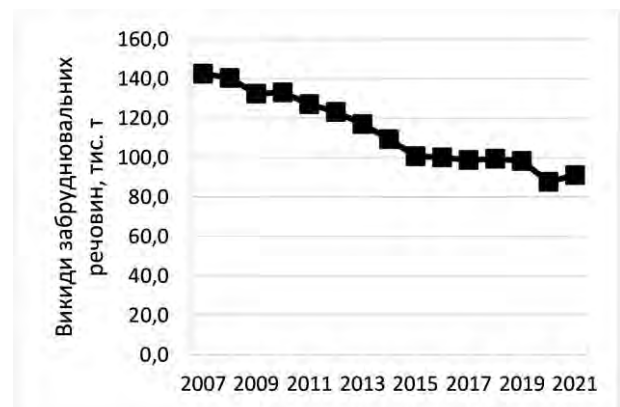


Рис. 6. Динаміка викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

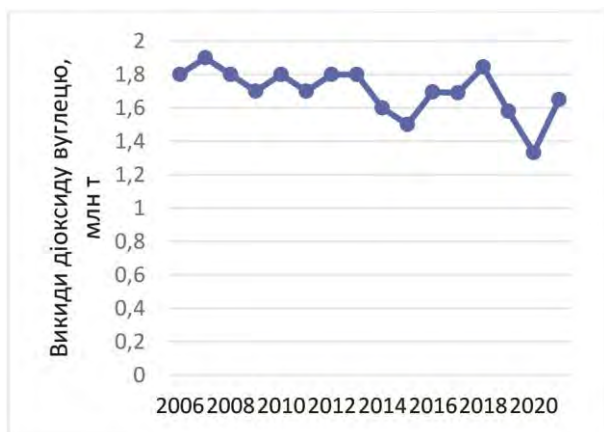


Рис. 7. Динаміка викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

Розглянемо структуру викидів діоксиду вуглецю транспортною системою за міжнародними методиками [43–45]. Як показано в праці [43], легкі, середні та важкі транспортні засоби, що здійснюють вантажні перевезення, сумарно становлять 40% викидів від загального обсягу викидів. До джерел викидів у атмосферу, спричинених роботою транспортної системи, належать також легкові автомобілі, мікроавтобуси, автобуси, тролейбуси, трамваї, фонікулери, мотоцикли, водний, залізничний та повітряний транспорт тощо. Таку саму частку викидів (41%) спричиняють легкові автомобілі. Цей недолік автомобільного ринку нині є критичним, оскільки, як вважають фахівці [44], викиди від легких вантажівок збільшаться удвічі порівняно зі стандартними легковими автомобілями в період

2021–2026 рр. (165–178 г CO₂/миль проти 240–257 г CO₂/миль відповідно) [45]. До пересувних джерел, що генерують викиди в атмосферу вуглецевмісних сполук, також належать авіаційні перевезення – 7%, перевезення залізничним транспортом – 2%, водним транспортом – 2%, мотоциклами та автобусами – 1% [43]. Отже, на громадський транспорт припадає менше ніж 5% від усіх викидів вуглецевмісних сполук в атмосферу. З огляду на показники, наведені на рис. 7, можна розрахувати, що стосовно всіх викидів близько 83 тис. т у середньому генерується автобусними транспортними засобами.

Отже, аналіз пасажирських перевезень в обласному місті, яке є типовим прикладом населеного пункту з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та з розвинутою мережею громадських перевезень, указує на необхідність пошуку ефективних підходів зменшення забруднення атмосфери вуглецевмісними сполуками шляхом оптимізування організації мереж громадського транспорту на засадах концепції розумного міста.

Унаслідок вивчення досягнень сучасних наукових теорій, викладених у роботах учених [46–53], серед відомих напрямів оптимізації мережі громадського транспорту в межах концепції розумного міста виокремимо три основні підходи: 1) надання громадському транспорту пріоритетності на дорозі; 2) перехід на електричні та гібридні транспортні засоби; 3) упровадження інформаційних технологій моніторингу (рис. 8).



Рис. 8. Основні напрями оптимізації мережі громадського транспорту в межах концепції розумного міста (систематизовано авторами за матеріалами [42–48])

За першим підходом у розумному місті зменшення кількості транспортних засобів на дорозі досягається завдяки наданню переваги громадському транспорту, знижуючи привабливість його альтернативи – водіння автомобіля. Коли пересування громадським транспортом є швидшим і зручнішим, ніж їздити автомобілем, коли громадський транспорт їздить часто та є дешевшим, то щоразу більше людей

ним користуватимуться. Така оптимізація правил дорожнього руху також сприяє сталому розвитку міст, оскільки збільшує доступність громадського транспорту та зв'язує околиці населених пунктів із середмістям, що зменшує потребу мати власний автомобіль і необхідність відповідної кількості місць для паркування. Це збільшує територію для інших цілей, таких як зелені зони або велосипедні доріжки.

Загалом, такий процес може допомогти зменшити розростання міст і сприятиме впровадженню більш стійких моделей розвитку міської інфраструктури. Зрештою, це дасть змогу досягти цілей сталого розвитку завдяки зменшенню кількості автомобілів на дорозі та пов'язаних із цим викидами оксидів вуглецю в атмосферу.

За другим підходом у розумному місті зміни концентруються на структурній трансформації парку транспортних засобів у напрямі збільшення частки електричних і гібридних автобусів, що приводить до оптимізації самих типів транспортних засобів і може суттєво зменшити вуглецевий слід громадського транспорту. Перехід на електричні або гібридні автобуси сприятиме значному скороченню викидів вуглекислого газу порівняно з традиційними дизельними автобусами.

У третьому підході ключову роль відіграють інформаційні технології, що дають змогу відстежувати в реальному часі транспортні засоби, допомагають спостерігати за трафіком на дорозі, прогнозувати

маршрут, спричиняють зменшення споживання палива шляхом скорочення як довжини маршрутів, так і часу перебування транспортних засобів у дорозі. Така оптимізація сприяє також зменшенню часу очікування пасажирів на транспортні засоби та їхнього перебування в дорозі.

Проаналізуємо наявні методи й засоби, покликані оптимізувати функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах щодо зниження вуглецевих викидів (див. рис. 9).

1. Розумні транспортні системи.
2. Електричні транспортні засоби.
3. Мережі спільного використання транспорту.
4. Розумні застосунки та інформаційні системи.
5. Інноваційні системи оплати.
6. Безпілотні транспортні засоби.
7. Інформаційні табло та системи оголошень.
8. Мережі велосипедних доріжок та обладнані тротуари.
9. Системи екологічного моніторингу.



Рис. 9. Методи та засоби оптимізації мереж транспортних систем пасажирських перевезень (власна розробка)

Детально розглянемо перелічені методи оптимізації функціонування мережі транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах щодо зниження вуглецевих викидів (рис. 9). Кожен інструмент має певні ознаки та потребує конкретних практичних заходів для його застосування [54–56]. У процесі впровадження концепції розумного міста, звичайно, ці інструменти необхідно адаптувати до конкретних обставин та особливостей транспортної мережі міста, щоб досягти успіху.

Розумні транспортні системи використовують різні технології, зокрема сенсори, мережі зв'язку та аналітичні алгоритми, щоб забезпечити оптимальне управління громадським транспортом у місті. Розумні

транспортні системи дають змогу максимально скоротити час очікування пасажирів на громадський транспорт, спростити оплату та забезпечити безпеку для населення.

До електричних транспортних засобів належать електромобілі, електричні скутери, електричні велосипеди, що мають нульовий викид шкідливих речовин, мінімізують витрати на паливо та забезпечують більшу екологічність всієї транспортної системи розумного міста.

У кожній країні розвиваються свої мережі спільного використання транспорту. Найбільш відомими у світі є мережі типу *Carsharing* та *Bike-sharing*. Вони створюють можливості

застосовувати транспорт у разі потреби, а не володіти ним, що знижує витрати на утримання та сприяє більш ефективному його використанню.

Мережі спеціальних велосипедних доріжок та обладнані для пішоходів тротуари в розумних містах створюють особливе транспортне середовище, де спеціальні розділені доріжки та тротуари для велосипедистів і пішоходів забезпечують безпеку та зручність для їх користувачів.

Зі стрімким розвитком інформаційних технологій і мобільних пристроїв з'явилися розумні застосунки та функціональні інформаційні системи. Вони допомагають пасажиром знайти інформацію про маршрути, точний час прибуття транспорту та розмір і спосіб оплати послуг. Розумні застосунки також наділені функціями забезпечення дотримання розкладу, візуалізації маршрутів і рекомендації переліку можливих маршрутів. Це не тільки підвищує ефективність використання громадського транспорту, а й зменшує затори на дорогах.

Інформаційні табло та системи оголошень надають пасажиром необхідну інформацію про маршрути, розклади та їх зміну через затримку транспорту безпосередньо на зупинках і в транспортних засобах. Це позитивно впливає на систему ефективного планування подорожей, сприяє комфорту пасажирів під час перебування в транспорті та на зупинках.

Упровадження інформаційних технологій у систему банкіну сприяло розвитку електронних систем оплат. Нині звичними є оплата безконтактними картками з допомогою мобільних застосунків та інших систем оплати, що суттєво спрощує сам процес оплати за користування транспортом, забезпечує швидкість і зручність для пасажирів, скорочує час очікування на зупинках та перебування в дорозі.

Щоразу більшої популярності набувають безпілотні транспортні засоби, до переліку яких можна додати автономні автомобілі, автономні автобуси та навіть дрони. Вони покликані забезпечити ефективність та безпечність транспортної системи, сприяти зниженню кількості аварій на дорогах, як би фантастично це не виглядало.

Поширення системи екологічного моніторингу в містах уможливило відслідковування стану довкілля, контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі, що потрапляють туди через викиди забруднювальних речовин від транспорту та різних виробничих процесів у промисловості та на комунальних господарствах. Зібрана інформація систематизується екологічними інспекціями та дає змогу керівникам

органів самоврядування та громадськості приймати ефективні управлінські рішення з метою зниження викидів та покращення якості повітря в містах.

Проаналізовані методи та засоби є лише деякими з тих, що покликані оптимізувати функціонування транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах з погляду зниження вуглецевих викидів. Їх перелік сформовано також з огляду на потреби в забезпеченні ефективності та зручності транспортної системи для пасажирів.

Аналіз сучасного доробку вчених [43, 50, 51] дав змогу виокремити успішні проекти оптимізації мережі громадського транспорту, що використовуються для створення розумних міст. Нижче опишемо деякі з цих проектів.

У кількох містах світу успішно оптимізували мережу громадського транспорту, щоб зменшити викиди вуглецю. Наприклад, у Парижі міська влада запровадила новий план громадського транспорту, який віддав пріоритет автобусним і велосипедним доріжкам, зменшивши кількість автомобілів на дорозі та збільшивши кількість пасажирів громадського транспорту. Цей план сприяв скороченню викидів вуглецю від транспорту в місті на 14% [50].

Іншим прикладом є місто Богота, де запроваджено систему швидкого автобусного транспорту – *bus rapid transit (BRT)*, яка скоротила час у дорозі та покращила сполучення в місті. Ця система зменшила викиди вуглекислого газу на понад 300 тис. т на рік, що еквівалентно виведенню з доріг 60 тис. автомобілів [43]. Система швидкого автобусного транспорту (*BRT*) у Боготі є одним із найуспішніших проектів оптимізації мережі громадського транспорту у світі.

Система, відома як *TransMilenio*, була вперше впроваджена 2000 р. і відтоді розширилася, щоб охопити понад 112 кілометрів смуг, призначених лише для автобусів, щодня обслуговуючи понад 2,6 млн пасажирів [43]. Однією з ключових особливостей системи *TransMilenio* є використання зчленованих автобусів, що можуть перевозити до 160 пасажирів одночасно. Ці автобуси курсують виділеними смугами, уникаючи заторів і скорочуючи час подорожі для пасажирів. Система також використовує передоплачену систему смарт-карток, щоб пришвидшити посадку та зменшити затримки. *TransMilenio* досягла успіху в скороченні викидів вуглецю в Боготі. Забезпечивши швидшу та ефективнішу систему громадського транспорту, місто зменшило кількість автомобілів на дорогах,

що призвело до зниження забруднення повітря та викидів парникових газів. За інформацією Інституту світових ресурсів, система скорочує викиди вуглецю на понад 300 тис. т на рік, що еквівалентно виведенню з доріг 60 тис. автомобілів.

Окрім скорочення викидів вуглецю, система *TransMilenio* також мала значний соціальний та економічний вплив у Боготі. Покращивши зв'язок і доступність, система збільшила мобільність і економічні можливості для жителів, особливо тих, хто проживає в районах із низьким рівнем доходу. Система також сприяла відродженню громадських просторів, до того ж чимало автобусних станцій призначені для збору громади. Незважаючи на успіх, система *TransMilenio* зіткнулася з деякими проблемами, зокрема переповненістю в години пік і питаннями з обслуговуванням. Однак міська влада продовжує інвестувати в систему, розширюючи її на нові території та запроваджуючи сучасні технології для покращення продуктивності.

Загалом, схожою до системи *TransMilenio* в Боготі є система електричного австралійського транспорту майбутнього (*Electric Australian transport Systems*) [44], що є яскравим прикладом того, як оптимізація мережі громадського транспорту може зменшити викиди вуглецю та покращити якість життя мешканців. Справді, цей успіх надихнув уряди на подібні проекти в інших містах світу, продемонструвавши потенціал громадського транспорту для відігравання вирішальної ролі у розв'язанні проблеми зміни клімату та сприянні сталому розвитку міст.

Існує декілька методів оптимізації маршрутів, що можуть бути використані для досягнення мети цієї роботи. Один із методів – це використання алгоритмів маршрутизації. Ці алгоритми допомагають знайти найкоротший маршрут між двома точками на мапі, беручи до уваги різні фактори, зокрема дорожні затори та інші перешкоди. Якщо такий алгоритм застосовуватиметься для кожного маршруту громадського транспорту у Львові, то це допоможе розв'язати проблему затримок і зменшити час переміщення пасажирів.

Ще один метод – аналіз інформації про використання громадського транспорту у Львові. Збір відомостей про рух транспорту, пасажиропотік та затримки може допомогти визначити найбільш популярні маршрути та пункти призначення, а також виявити проблемні ділянки маршруту. Цю інформацію можна застосовувати для оптимізації

старих маршрутів і планування нових, що задовольнятимуть потреби пасажирів.

Також можна використовувати інформаційні технології для підвищення ефективності громадського транспорту. Наприклад, встановлення GPS-систем в автобусах і тролейбусах дасть змогу відслідковувати рух транспорту в режимі реального часу та надавати пасажирам точну інформацію про час прибуття транспорту на зупинку.

Геоінформаційні системи (ГІС) визначають найкоротший маршрут з огляду на різні обмеження, зокрема дорожні умови, розклади громадського транспорту та інші фактори.

Системи прогнозування пасажиропотоків прогнозують пасажиропотоки в різні години дня та на різних маршрутах, що допомагає підвищити ефективність транспорту та зменшити час очікування для пасажирів.

Використання інформації зі смартфонів пасажирів дає змогу в режимі реального часу відстежувати рух пасажирів і користуватися цією інформацією для оптимізації маршрутів транспорту.

Аналіз відомостей про історію подорожей допомагає визначити найпопулярніші маршрути та розклади громадського транспорту, що оптимізує маршрути та скорочує час очікування для пасажирів.

Використання розумних зупинок та системи "розумний регулятор" забезпечує координацію руху різних видів транспорту на ділянці дороги, що дає змогу зменшити час простою транспорту.

Для оптимізації маршруту кожного пасажиром можна використовувати алгоритми машинного навчання, що працюватимуть на основі інформації про рух транспорту в реальному часі, наявність вільних місць у транспорті та інші параметри. Тобто необхідно, щоб інтелектуальна система оптимізації маршруту мала доступ до такої інформації, зокрема, що надають GPS-трекери в транспорті, відкриті джерела даних про трафік та інші розроблені рішення.

Крім того, для забезпечення оптимального маршруту для кожного пасажиром система має брати до уваги його особисті уподобання. Наприклад, якщо пасажир хоче швидко дістатися до місця призначення, система пропонуватиме маршрути, які допоможуть це зробити. Якщо ж пасажир більш переймається комфортом подорожі, система буде пропонувати маршрути з меншою кількістю пересадок або з більш зручним транспортом.

Отже, важливо, щоб інтелектуальна система оптимізації маршруту збирала, аналізувала й використовувала різноманітну інформацію, щоб надати оптимальні маршрути кожному пасажирові громадського транспорту в реальному часі.

Якщо на дорозі виникає затор або змінюється розташування громадського транспорту, інтелектуальна система має динамічно корегувати маршрути. Для цього вона повинна мати доступ до поточної інформації про трафік, затори та розташування громадського транспорту, наприклад, за допомогою GPS-модулів і мережі датчиків, розміщених на дорогах.

Коли інтелектуальна система отримує оновлену інформацію про стан дороги та розташування громадського транспорту, вона має вирішувати, чи залишати пасажира на поточному маршруті, чи запропонувати альтернативний для досягнення мети з максимальною швидкістю та комфортом.

У разі затору чи зміни розташування громадського транспорту інтелектуальна система має швидко зробити розрахунки та запропонувати оптимальний маршрут. Важливо, щоб інформація про затори та інші перешкоди відображалася на табло в салоні громадського транспорту та на мобільному пристрої пасажира, щоб людина могла обрати оптимальний маршрут.

Для покращення процесу оптимізації маршруту та передбачення трафіку на дорозі можуть підійти різні типи нейронних мереж, залежно від точності та швидкості, які потрібні для системи [57].

1. Рекурентні нейронні мережі (*RNN*) – упроваджуються для роботи з послідовностями даних, такими як часові ряди. Вони можуть бути корисними для передбачення трафіку на дорозі на основі історичних даних.

2. Конволюційні нейронні мережі (*CNN*) – застосовуються для оброблення зображень, але також можуть бути корисними для передбачення трафіку на основі відеостримів з камер відеоспостереження.

3. Глибокі нейронні мережі (*DNN*) – упроваджуються для розв'язання складних завдань, зокрема передбачення маршрутів ускладнених міських мереж.

Нейронні мережі можуть бути використані для передбачення трафіку та оптимізації маршрутів у реальному часі, забезпечуючи ще більш точну та швидку роботу системи пасажирських перевезень.

Отже, організація транспортних систем пасажирських перевезень у розумних містах із низькими викидами CO₂ відрізняється від звичайної

організації системи перевезення пасажирів за декількома параметрами:

1) використання електричного або гібридного транспорту замість автомобілів із дизельними або бензиновими двигунами;

2) застосування спільного транспорту замість приватного, наприклад великі автобуси замість малих автомобілів. Це дає змогу знизити кількість транспорту на дорогах і зменшити затори;

3) використання мережі швидкісних трамваїв або метрополітенів. Ці системи перевезення пасажирів забезпечують високу швидкість і рівень комфорту, стаючи альтернативою приватному транспорту;

4) упровадження сучасних інформаційних технологій для оптимізації маршрутів та моніторингу транспортного потоку. Це дає змогу підвищити ефективність транспортної системи та забезпечити швидку реакцію на зміни в транспортному потоці;

5) застосування динамічної системи ціноутворення на квитки залежно від навантаженості транспортного засобу та попиту на послугу. Це дає змогу зменшити загальну вартість транспорту для користувачів та забезпечити оптимальне використання транспорту.

Усі ці параметри допомагають покращити рівень пасажирських перевезень у розумних містах та зменшити викиди CO₂.

Отже, використання нейронних мереж сприяє оптимізації маршруту та передбаченню трафіку на дорозі, що є одним із ключових завдань покращення мереж громадського транспорту з низьковуглецевими викидами в атмосферу в межах концепції розумного міста.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Унаслідок аналізу пасажирських перевезень в обласному місті з населенням меншим ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та розвинутою мережею громадського транспорту виявлено, що з початком пандемії спостерігається зниження основних показників пасажиропотоків та деяке зростання обсягів викидів вуглецевовмісних сполук в атмосферу. Завдяки аналізу та класифікації наявних концептуальних підходів до оптимізації організації мереж громадського транспорту з метою скорочення викидів вуглецю встановлено три основні підходи: пріоритетність громадського транспорту, гібридизація та електризація транспортних засобів та впровадження IT-моніторингу. Під час систематизації наявних методів і засобів, покликаних оптимізувати функціонування транспортних

систем пасажирських перевезень у розумних містах, було досліджено такі групи: розумні транспортні системи; електричні транспортні засоби; мережі спільного використання транспорту; розумні застосунки та інформаційні системи; інноваційні системи оплати; безпілотні транспортні засоби; інформаційні табло та системи оголошень; мережі велосипедних доріжок та обладнані тротуари; системи екологічного моніторингу. Вивчення успішних проєктів оптимізації мережі громадського транспорту показало, що успішність впровадження змін для оптимізації транспортних мереж громадських перевезень не залежить від розмірів міст, а лише від вмотивованості учасників процесу змін (влада, бізнес та мешканці). Унаслідок визначення сучасних проблем та упереджень, що перешкоджають впровадженню ефективних проєктів, було виокремлено найбільш типову перешкоду – "опір змінам", шляхи подолання якої є завершеним теоретико-практичним завданням. У дослідженні різних типів нейронних мереж запропоновано використовувати ті, що сприяють оптимізації маршруту та передбаченню трафіку

на дорозі, а саме: рекурентні, конволюційні та глибокі нейронні мережі.

Отже, оптимізація мережі громадського транспорту відіграє вирішальну роль у зниженні викидів вуглекислого газу в транспортному секторі. Надаючи привабливу альтернативу водінню, зменшуючи вуглецевий слід громадського транспорту та сприяючи сталому розвитку міст, оптимізація мережі громадського транспорту може допомогти зменшити викиди вуглецю та пом'якшити наслідки зміни клімату. Успішні проєкти в містах по всьому світу продемонстрували ефективність оптимізації мережі громадського транспорту для зменшення викидів вуглецю, що робить цю стратегію критично важливою для урядів і міст у боротьбі зі зміною клімату й для підвищення якості життя населення.

Подальші дослідження важливо присвятити розробленню інтелектуальних систем, що сприятимуть оптимізації мереж громадського транспорту з низьковуглецевими викидами в атмосферу в межах концепції розумного міста.

Список літератури

1. Boreiko O., Teslyuk V. Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*. 2016. P. 124–126. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>
2. Boreiko O., Teslyuk V. Model of data collection controller of automated processing systems for passenger traffic public transport smart city based on petri nets. *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*. 2017. P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020066>
3. Boz Y., Cay T. How smart and sustainable are the cities in Türkiye? – National policies and the enthusiasm level of the local governments. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. No 4. 26002 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26002>
4. Bublyk M., Udovychenko T., Medvid R. Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraine's economy. *Economics. Ecology. Socium*. 2019. Vol. 3. No 2. P. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31520/2616-7107/2019.3.2-6>
5. Bublyk M., Kowalska-Styczeń A., Lytvyn V., Vysotska V. The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*. 2021. Vol. 14. No 18. 5951 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185951>
6. Bushuyev S., Inna L., Alla B., Alexander L., Khusainova M. Creating urban transportation networks grounded in the principles of the smart port-city paradigm. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 231. P. 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211>
7. Wang H., Wang Y. Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 63. 103629 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>
8. Vanli T., Akan T. Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis. *Cities*. 2023. Vol. 142. 104527 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
9. Wolniak R., Jonek-Kowalska I. The level of the quality of life in the city and its monitoring. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*. 2021. Vol. 34. No 3. P. 376–398. DOI: <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
10. Guenduez A., Mergel I., Schedler K., Fuchs S., Douillet C. Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers. *Urban Governance*. 2024. Vol. 2. No 1. P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>
11. Dai Y., Hasanefendic S., Bossink B. A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 101, 105112 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>

12. Jonek-Kowalska I. Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption. *Resources Policy*. 2022. Vol. 77. No 1. 102701 p. DOI: <https://10.1016/j.resourpol.2022.102701>.
13. Kim J., Feng Y. Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*. 2024. Vol. 147, 104832 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>
14. Koshtura D., Bublyk M., Matseliukh Y., Dosyn D., Chyrun L., Lozynska O., Karpov I., Peleshchak I., Maslak M., Sachenko O. Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning. *CEUR workshop proceedings*. 2020. Vol. 2631, P. 172–183. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
15. Литвин В., Бублик М., Висоцька В., Мацелюх Ю. Технологія візуальної симуляції пасажиропотоків у сфері громадського транспорту Smart City. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2022. №4. С. 106–121. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>
16. Lim Y., Edelenbos J., Gianoli A. What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index. *Urban Governance*. 2023. Vol. 4, P. 104-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>
17. Lin H., Wang W., Zou Y., Chen H. An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory. *Global Energy Interconnection*. 2023. Vol. 6. No 5. P. 634–644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>
18. Matseliukh Y., Vysotska V., Bublyk M. Intelligent system of visual simulation of passenger flows. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2604. P. 906–920. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2604/paper60.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
19. Nath N., Nitanai R., Manabe R., Murayama A. A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods. *Habitat International*. 2023. Vol. 142, 102963 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>
20. Nguyen H., Nawara D., Kashef R. Connecting the Indispensable Roles of IoT and Artificial Intelligence in Smart Cities: A Survey. *Journal of Information and Intelligence*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
21. Podlesna L., Bublyk M., Grybyk I., Matseliukh Y., Burov Y., Kravets P., Lozynska O., Karpov I., Peleshchak I., Peleshchak R. Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2631, P. 502 – 515. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
22. Sharifi A., Allam Z., Bibri S., Khavarian-Garmsir A. Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*. 2024. Vol. 146. 104659 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
23. Shiu S. Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*. 2024. Vol. 4. No 1. 100179 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>
24. Spicer Z., Goodman N., Wolfe D. How "smart" are smart cities? Resident attitudes towards smart city design. *Cities*, 2023. Vol. 141. 104442 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
25. Tang J., Li Y. Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 101, 105145 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>
26. Chen Y., Chen S., Miao J. Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor. *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 104, 107328 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>
27. Chen Z., Gan W., Wu J., Lin H., Chen C. Metaverse for smart cities: A survey. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*. 2023. Vol. 4. P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.12.002>
28. Chen C., Li S., Wang L. Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024. Vol. 201, 123264 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123264>
29. Резолюція Генеральної Асамблеї Організації Об'єднаних Націй "Глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року", від 25 вересня 2015 року № 70/1 (Sustainable Development Goals (SDGs), United Nations General Assembly, 2015). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/722/2019> (дата звернення 01.02.2024).
30. Указ Президента України "Стратегія сталого розвитку «Україна – 2020»" (ухвалена від 12 січня 2015 р. № 5/2015) URL: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (дата звернення 01.02.2024).
31. Постанова КМ України "Державна стратегія регіонального розвитку до 2020 року" (затверджена від 6 серпня 2014 р. №385) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/686-2019-%D1%80#Text> (дата звернення 01.02.2024).
32. Про засади державної регіональної політики (док. 156-VIII від 05.02.2015 р.)
33. Указ Президента України "Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року" № 722/2019, від 30.09.2019
34. Національна доповідь "Цілі сталого розвитку: Україна"
35. Bublyk M., Vysotska V., Matseliukh Y., Mayik V., Nashkarska M. Assessing Losses of Human Capital Due to Man-Made Pollution Caused by Emergencies. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2805. P. 74–86. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2805/paper6.pdf> (дата звернення: 01.02.2024).
36. Бублик М. Механізм регулювання техногенних збитків промислових підприємств: логістика рециркулювання як інструмент його застосування. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". "Логістика"*. 2012. № 749, С. 530–537. URL: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3273> (дата звернення: 01.02.2024).

37. Bubyk M. Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities. *Zarządzanie organizacją w warunkach niepewności teoria i praktyka*. 2013. P. 19–29. URL: <https://www.ibuk.pl/fiszka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html> (дата звернення: 01.02.2024).
38. Jonek-Kowalska I. Housing infrastructure as a determinant of quality of life in selected polish smart cities. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5. No 3. P. 924–946. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030046>
39. Головне управління статистики у Львівській області. URL: https://ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2.htm (дата звернення 01.02.2024).
40. Портал "Панель міста". URL: https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom (дата звернення 01.02.2024).
41. Дія. Відкриті дані Центр компетенцій в сфері відкритих даних. URL: <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e> (дата звернення 01.02.2024).
42. Показники роботи громадського транспорту. Набір даних. URL: <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu> (дата звернення 01.02.2024).
43. Acosta F. Bogotá biarticulado de TransMilenio por la av. Caracas, 29 December 2023. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bogota1_biarticulado_de_TransMilenio_por_la_av._Caracas.JPG (дата звернення: 01.02.2024).
44. Transdev Australasia finalist in Global Sustainability Award, *Carbon footprint*. 2023. available at: <https://www.transdev.com/en/electro-mobility/> (дата звернення: 01.02.2024).
45. Murphy J. Truck Carbon Footprint Calculator: Choose Your Pickup's Year, Make, *Model Carbon Ecological Footprint Calculators*. 2023. URL: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/index.html> (дата звернення: 01.02.2024).
46. Dave P., Sahu L., Tripathi N., Bajaj S., Yadav R., Patel K. Emissions of non-methane volatile organic compounds from a landfill site in a major city of India: Impact on local air quality. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. No 7. 4537 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04537>
47. Tiseo I. U.S. light-duty vehicle GHG emissions 1990-2019. *Statista*. 2021. Vol. 31. URL: <https://www.statista.com/statistics/1235094/us-light-duty-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
48. MotorTrend Staff. These are the most fuel-efficient Pickups you can buy. *MotorTrend*. 2021. Vol. 3. URL: <https://www.motortrend.com/features/most-fuel-efficient-pickup-trucks/> (дата звернення: 01.02.2024).
49. Wagner I. Light trucks in the U.S. – best-selling models 2020. *Statista*. 2021. Vol. 1. URL: <https://www.statista.com/statistics/204473/best-selling-trucks-in-the-united-states-from-january-to-october-2021/> (дата звернення: 01.02.2024).
50. Tiseo I. U.S. heavy-duty vehicle GHG emissions 1990-2019. *Statista*. 2021. Vol. 2. URL: <https://www.statista.com/statistics/1120519/us-med-heavy-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
51. Leung J. Federal Vehicle Standards, *Center for Climate and Energy Solutions*. 2021. Vol. 21. URL: <https://www.c2es.org/content/regulating-transportation-sector-carbon-emissions/> (дата звернення: 01.02.2024).
52. Zalzal P. The introduction of Ford's electric F-150 pickup truck is a big milestone in the race to zero-emission vehicles. *Climate*. 2021. Vol. 411. 202 p. URL: <https://blogs.edf.org/climate411/2021/05/17/the-introduction-of-fords-electric-f-150-pickup-truck-is-a-big-milestone-in-the-race-to-zero-emission-vehicles/> (дата звернення: 01.02.2024).
53. Taotao, D., John, D. Recent developments in bus rapid transit: a review of the literature. *Transport Reviews*. 2011. Vol. 31. No 1. P.69–96. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2010.492455>
54. Volvo Trucks USA. NFI begins piloting Volvo VNR electric heavy-duty trucks in Southern California. 2020. URL: <https://www.volvotrucks.us/news-and-stories/press-releases/2020/september/nfi-begins-piloting-volvo-vnr-electric-heavy-duty-trucks-in-southern-california/> (дата звернення: 01.02.2024).
55. The International Council on Clean Transportation. *Fact sheet: Europe*. 2019. URL: https://theicct.org/sites/default/files/Gas_v_Diesel_CO2_emissions_EN_Fact_Sheet2019_05_07_0.pdf (дата звернення: 01.02.2024).
56. Schildgen B. Do diesel engines produce less CO2 than regular engines? *Sierra Club*. 2018. URL: <https://www.sierraclub.org/sierra/ask-mr-green/do-diesel-engines-produce-less-co2-regular-engines> (дата звернення: 01.02.2024).
57. Majumder H., Mahmudul K., Tao H., Wei X. Road crack avoidance: a convolutional neural network-based smart transportation system for intelligent vehicles. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2023. Vol. 2. No 1. P.122–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2175613>
58. Asha A., Arunachalam R., Poonguzhali I., Urooj S., Alelyani S. Optimized RNN-based performance prediction of IoT and WSN-oriented smart city application using improved honey badger algorithm. *Measurement*, 2023. Vol. 210, 112505 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112505>
59. Jingqiu G., Yangzexi L., Qingyan Y., Yibing W., Shouen F. GPS-based citywide traffic congestion forecasting using CNN-RNN and C3D hybrid model. *Transportmetrica A Transport Science*. 2021. Vol. 17. No 2. P.190–211. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1745927>

60. Kong J., Huang J., Yu H., Deng H., Gong J., Chen H. RNN-based default logic for route planning in urban environments. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 338. P. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.012>
61. Badu-Marfo G., Farooq B., Mensah D., Al Mallah R. An ensemble federated learning framework for privacy-by-design mobility behaviour inference in smart cities. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 97. 104703 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104703>
62. Herath H., Mittal M. Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review. *International Journal of Information Management Data Insights*. 2022. Vol. 2. No 1. 100076 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2022.100076>

References

1. Boreiko, O., Teslyuk, V. (2016), "Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city", *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*, P. 124–126, DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>
2. Boreiko, O., Teslyuk, V. (2017), "Model of data collection controller of automated processing systems for passenger traffic public transport smart city based on petri nets", *2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*, P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2017.8020066>
3. Boz, Y., Cay, T. (2024), "How smart and sustainable are the cities in Turkiye? - National policies and the enthusiasm level of the local governments", *Heliyon*, 10(4), 26002 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26002>
4. Bublyk, M., Udovychenko T., Medvid R. (2019), "Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraines economy". *Economics. Ecology. Socium*, 3 (2), P. 55–61. DOI: <https://doi.org/10.31520/2616-7107/2019.3.2-6>
5. Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., Vysotska, V. (2021), "The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis", *Energies*, 14(18), 5951 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185951>
6. Bushuyev, S., Inna, L., Alla, B., Alexander, L., Khusainova, M. (2023), "Creating urban transportation networks grounded in the principles of the smart port-city paradigm", *Procedia Computer Science*, 231, P. 323–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.211>
7. Wang, H., Wang, Y. (2024), "Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63, 103629 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>
8. Vanlı, T., Akan, T. (2023), "Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis". *Cities*, 142, 104527 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
9. Wolniak, R., Jonek-Kowalska, I., (2021), "The level of the quality of life in the city and its monitoring", *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 34(3), P. 376–398. DOI: <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
10. Guenduez, A., Mergel, I., Schedler, K., Fuchs, S., Douillet, C. (2024), "Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers". *Urban Governance*. 2 (1), P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>
11. Dai, Y., Hasanefendic, S., Bossink, B. (2024), "A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology", *Sustainable Cities and Society*, 101, 105112 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>
12. Jonek-Kowalska, I. (2022), "Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption", *Resources Policy*, 77, 102701 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102701>
13. Kim, J. S., Feng, Y. (2024), "Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China". *Cities*, 147, 104832 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>
14. Koshtura, D., Bublyk, M., Matseliukh, Y., Dosyn, D., Chyrun, L., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Maslak, M., Sachenko, O. (2020), "Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning", *CEUR workshop proceedings*, 2631, P. 172–183, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf> (last accessed 01.02.2024).
15. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., Matseliukh, Y. (2022), "Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 4, P. 106–121. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>
16. Lim, Y., Edelenbos, J., Gianoli, A. (2023), "What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index", *Urban Governance*, 4, P. 104–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>
17. Lin, H., Wang, W., Zou, Y., Chen, H. (2023), "An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory", *Global Energy Interconnection*, 6(5), P. 634–644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>
18. Matseliukh, Y., Vysotska, V., Bublyk, M. (2020), "Intelligent system of visual simulation of passenger flows". *CEUR Workshop Proceedings*, 2604, P. 906–920, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2604/paper60.pdf> (last accessed 01.02.2024).

19. Nath, N., Nitanaï, R., Manabe, R., Murayama, A. (2023), "A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods", *Habitat International*, 142, P. 102963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>
20. Nguyen, H., Nawara, D., Kashef, R. (2024), "Connecting the indispensable roles of IoT and artificial intelligence in smart cities: a survey", *Journal of Information and Intelligence*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
21. Podlesna, L., Bublyk, M., Grybyk, I., Matseliukh, Y., Burov, Y., Kravets, P., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Peleshchak, R. (2020), "Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City", *CEUR Workshop Proceedings*, 2631, P. 502–515 available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf> (last accessed 01.02.2024).
22. Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S., Khavarian-Garmsir, A. (2024), "Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs", *Cities*, 146, 104659 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
23. Shiu, S. (2024), "Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective", *Aging and Health Research*, 4(1), 100179 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>
24. Spicer, Z., Goodman, N., Wolfe, D. A. (2023), "How "smart" are smart cities? Resident attitudes towards smart city design". *Cities*, 141, 104442 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
25. Tang, J., Li, Y. (2024), "Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China", *Sustainable Cities and Society*, 101, 105145 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>
26. Chen, Y., Chen, S., Miao, J. (2023), "Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor", *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107328 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>
27. Chen, Z., Gan, W., Wu, J., Lin, H., Chen, C. (2023), "Metaverse for smart cities: A survey", *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 4, P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.12.002>
28. Chen, C., Li, S., Wang, L. (2024), "Can smart cities reduce labor misallocation? Evidence from China", *Technological Forecasting and Social Change*, 201, 123264 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123264>
29. Resolution of the United Nations General Assembly "Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development", dated September 25, 2015 No. 70/1 (Sustainable Development Goals (SDGs), United Nations General Assembly, 2015), available at: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (last accessed 01.02.2024).
30. Decree of the President of Ukraine "Sustainable Development Strategy "Ukraine – 2020" (approved on January 12, 2015 No. 5/2015), available at: <https://www.president.gov.ua/documents/7222019-29825> (last accessed 01.02.2024).
31. Resolution (Order) of the Cabinet of Ministers of Ukraine "State strategy for regional development until 2020" (approved on August 6, 2014 No. 385), available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/686-2019-%D1%80#Text> (last accessed 01.02.2024).
32. "On the principles of state regional policy" (doc. 156-VIII dated February 5, 2015), available at: https://ukrstat.gov.ua/csr_prezent/2.htm (last accessed 01.02.2024).
33. Decree of the President of Ukraine "On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030" No. 722/2019, dated September 30, 2019, available at: <https://www.undp.org/ukraine/publications/sustainable-development-strategy-ukraine-2030> (last accessed 01.02.2024).
34. National report "Goals of Sustainable Development: Ukraine", available at: <https://www.undp.org/ukraine/publications/sustainable-development-goals-2017-baseline-national-report> (last accessed 01.02.2024).
35. Bublyk, M., Vysotska, V., Matseliukh, Yu., Mayik, V., & Nashkerska M. (2020), "Assessing Losses of Human Capital Due to Man-Made Pollution Caused by Emergencies", *CEUR Workshop Proceedings*, 2805, P. 74–86, available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2805/paper6.pdf> (last accessed 01.02.2024).
36. Bublyk, M. (2012), "Mechanism to regulate the technogenic damage of industrial enterprises: recycling logistics as an instrument of its application", *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, Logistics*, 749, P. 530–537, available at: <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3273> (last accessed 01.02.2024).
37. Bublyk, M. (2013), "Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities". *Zarządzanie organizacja w warunkach niepewności teoria i praktyka*. P. 19 – 29, available at: <https://www.ibuk.pl/fizyka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html> (last accessed 01.02.2024).
38. Jonek-Kowalska, I. (2022), "Housing Infrastructure as a Determinant of Quality of Life in Selected Polish Smart Cities". *Smart Cities*, 5(3), P. 924–946. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030046>
39. Main Department of Statistics in Lviv Region, available at: <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/> (last accessed 01.02.2024).
40. "City Panel" portal, available at: https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom (last accessed 01.02.2024).
41. Action. Open data Competence center in the field of open data, available at: <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e> (last accessed 01.02.2024).

42. Performance indicators of public transport. Data set, available at: <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu> (last accessed 01.02.2024).
43. Acosta, F., (2023), "Bogotá biarticulado de TransMilenio por la av. Caracas, 29 December 2013", available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BogotA1_biarticulado_de_TransMilenio_por_la_av._Caracas.JPG
44. Transdev Australasia finalist in Global Sustainability Award, (2023), *Carbon footprint*. available at: <https://www.transdev.com/en/electro-mobility/> (last accessed 01.02.2024).
45. Murphy J. (2023), "Truck Carbon Footprint Calculator: Choose Your Pickup's Year, Make", *Model Carbon Ecological Footprint Calculators*, available at: <https://8billiontrees.com/carbon-offsets-credits/carbon-ecological-footprint-calculators/truck-calculator/index.html> (last accessed 01.02.2024).
46. Dave, P., Sahu, L., Tripathi, N., Bajaj, S., Yadav, R., Patel, K. (2020), "Emissions of non-methane volatile organic compounds from a landfill site in a major city of India: Impact on local air quality", *Heliyon*, 6(7), P. e04537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04537>
47. Tiseo, I. (2021), "U.S. light-duty vehicle GHG emissions 1990-2019", *Statista*, 31, available at: <https://www.statista.com/statistics/1235094/us-light-duty-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
48. MotorTrend Staff. (2021), "These are the most fuel-efficient Pickups you can buy", *MotorTrend*, 3, available at: <https://www.motortrend.com/features/most-fuel-efficient-pickup-trucks/> (last accessed 01.02.2024).
49. Wagner, I. (2021), "Light trucks in the U.S. – best-selling models 2020", *Statista*, 1, available at: <https://www.statista.com/statistics/204473/best-selling-trucks-in-the-united-states-from-january-to-october-2021/> (last accessed 01.02.2024).
50. Tiseo, I. (2021), "U.S. heavy-duty vehicle GHG emissions 1990-2019", *Statista*, 2, available at: <https://www.statista.com/statistics/1120519/us-med-heavy-trucks-vehicle-ghg-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
51. Leung, J. (2021), "Federal Vehicle Standards", *Center for Climate and Energy Solutions*, 21, available at: <https://www.c2es.org/content/regulating-transportation-sector-carbon-emissions/> (last accessed 01.02.2024).
52. Zalzal, P. (2021), "The introduction of Ford's electric F-150 pickup truck is a big milestone in the race to zero-emission vehicles", *Climate*, 411, 202 p. available at: <https://blogs.edf.org/climate411/2021/05/17/the-introduction-of-fords-electric-f-150-pickup-truck-is-a-big-milestone-in-the-race-to-zero-emission-vehicles/> (last accessed 01.02.2024).
53. Taotao, D., John, D., (2011), "Recent developments in bus rapid transit: a review of the literature", *Transport Reviews*, 31 (1), P.69–96. DOI: [10.1080/01441647.2010.492455](https://doi.org/10.1080/01441647.2010.492455)
54. Volvo Trucks USA. (2020), NFI begins piloting Volvo VNR electric heavy-duty trucks in Southern California, available at: <https://www.volvotrucks.us/news-and-stories/press-releases/2020/september/nfi-begins-piloting-volvo-vnr-electric-heavy-duty-trucks-in-southern-california/> (last accessed 01.02.2024).
55. The International Council on Clean Transportation. (2019), *Fact sheet: Europe*, available at: https://theicct.org/sites/default/files/Gas_v_Diesel_CO2_emissions_EN_Fact_Sheet2019_05_07_0.pdf (last accessed 01.02.2024).
56. Schildgen, B. (2018). "Do diesel engines produce less CO₂ than regular engines?" *Sierra Club*, available at: <https://www.sierraclub.org/sierra/ask-mr-green/do-diesel-engines-produce-less-co2-regular-engines> (last accessed 01.02.2024).
57. Majumder, H., Mahmudul, K., Tao, H., Wei, X., (2023), "Road crack avoidance: a convolutional neural network-based smart transportation system for intelligent vehicles", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2 (1), P.122–132. DOI: <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2175613>
58. Asha, A., Arunachalam, R., Poonguzhali, I., Urooj, S., Alelyani, S. (2023), "Optimized RNN-based performance prediction of IoT and WSN-oriented smart city application using improved honey badger algorithm", *Measurement*, 210, 112505 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112505>
59. Jingqiu, G., Yangzexi, L., Qingyan, Y., Yibing, W., Shouen, F., (2021), "GPS-based citywide traffic congestion forecasting using CNN-RNN and C3D hybrid model", *Transportmetrica A Transport Science*, 17 (2), P. 190–211. DOI: <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1745927>.
60. Kong, J., Huang, J., Yu, H., Deng, H., Gong, J., Chen, H. (2019), "RNN-based default logic for route planning in urban environments", *Neurocomputing*, 338, P. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.012>
61. Badu-Marfo, G., Farooq, B., Mensah, D. O., Al Mallah, R. (2023), "An ensemble federated learning framework for privacy-by-design mobility behaviour inference in smart cities", *Sustainable Cities and Society*, 97, 104703 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104703>
62. Herath, H., Mittal, M. (2022), "Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review", *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100076 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2022.100076>

Відомості про авторів / About the Authors

Мацелюх Юрій Романович – Національний університет "Львівська політехніка", аспірант кафедри інформаційних систем та мереж, Львів, Україна; e-mail: indeed.post@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1721-7703>

Литвин Василь Володимирович – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", завідувач кафедри інформаційних систем та мереж, Львів, Україна; e-mail: vasyi.v.lytvyn@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9676-0180>

Matseliukh Yurii – Lviv Polytechnic National University, PhD Student of Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

Lytvyn Vasyl – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Lviv Polytechnic National University, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

ANALYSIS OF PASSENGER TRANSPORTATION AND THE PUBLIC TRANSPORTATION IMPACT ON THE REDUCTION IN A SMART CITY

The state of atmospheric pollution is determined by the growth of the population, the amount of transport and the generated volumes of emissions. **The object** is the process of analyzing passenger transportation in the city. **The subject** is passenger transport analysis methods. **Purpose:** analysis of passenger transportation and approaches to optimization of public transport based on the concept of a smart city. **Tasks:** analysis of passenger transportation, classification of existing conceptual approaches to optimization of public transport with low carbon emissions, systematization of existing methods, means and types of neural networks in smart cities, analysis of successful implementation projects. **Methods** of statistical analysis, linear and non-linear interpolation, logical generalization, comparison, grouping, analysis and synthesis. **Results:** the analysis of passenger transportation in the city revealed that statistical data sets indicate a decrease in the main indicators of passenger traffic and an increase in the volume of emissions of carbon-containing compounds. The classification of existing approaches to the optimization of public transport is carried out according to the priority of public transport, hybridization and electrification of vehicles and the implementation of IT monitoring. During the systematization of methods and means in smart cities, the following are highlighted: smart transport systems; electric vehicles; transport sharing networks; smart applications and information systems; innovative payment systems; unmanned vehicles; information boards and announcement systems; networks of bicycle paths and equipped sidewalks; environmental monitoring systems. Among neural networks, recurrent, convolutional, and deep neural networks have been proposed as those that contribute to route optimization and traffic prediction. **Conclusions:** the statistical analysis of passenger transportation established that reducing carbon dioxide emissions is an unresolved task for both public transport and the transportation system. It is proposed to include methods and means that optimize public transport, reducing the carbon footprint of the initiatives of implementing the concept of a smart city, which are successful all over the world. It is proposed to use recurrent, convolutional and deep neural networks to optimize passenger transportation in smart cities.

Keywords: passenger carriage; smart city; low-carbon emissions; system analysis; analysis methods.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мацелюх Ю. Р., Литвин В. В. Аналіз пасажирських перевезень та вплив громадського транспорту на скорочення викидів вуглецю в розумному місті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 109–127. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109>

Matseliukh, Y., Lytvyn, V. (2024), "Analysis of passenger transportation and the public transportation impact on the reduction in a smart city", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 109–127. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109>

УДК 004.75

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.128>

С. МІНУХІН, Н. КОПІЛОВ

МЕТОД ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ *APACHE SPARK* НА ОСНОВІ СЕГМЕНТУВАННЯ ДАНИХ І НАЛАШТУВАНЬ КОНФІГУРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ

У використанні сучасних інструментів оброблення великих даних виникає проблема підвищення продуктивності сучасних фреймворків у контексті ефективного налаштування різних конфігураційних параметрів. **Об'єктом дослідження** є обчислювальні процеси оброблення великих даних із застосуванням технологій надпродуктивних фреймворків. **Предметом** є методи та підходи до ефективного налаштування конфігураційних параметрів фреймворків в умовах обмежень середовищ віртуалізації та локального ресурсу. **Мета дослідження** полягає в підвищенні продуктивності режимів розгортання *Apache Spark* та *Apache Hadoop* на основі комбінованого підходу, що містить передпроцесне сегментування вхідних даних та налаштування основних та додаткових конфігураційних параметрів з огляду на обмеження віртуального середовища та локального ресурсу. Досягнення поставленої мети передбачає виконання низки **завдань**: 1) створити синтезований набір тестових даних *WordCount* для використання методів сегментування вхідної інформації; 2) визначити склад загальних та специфічних конфігураційних параметрів *Apache Spark* та *Apache Hadoop*, що найбільше впливають на продуктивність роботи фреймворків у режимах розгортання *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn (FIFO)*; 3) обґрунтувати зміни значень конфігураційних параметрів (прийняті за замовчуванням) за допомогою налаштувань рівня паралелізму, кількості розбиттів вхідного файлу відповідно до кількості ядер процесора, кількості завдань, що призначаються на кожне ядро та виконавця в системі; 4) перевірити теоретичні результати та довести їх використання на практиці. У дослідженні впроваджено такі **методи**: статистичний аналіз; метод генерації тестових даних за визначеними характеристиками сегментування з довільними обсягами інформації; системний підхід для комплексного оцінювання та аналізу продуктивності фреймворків на основі обраних конфігураційних параметрів. **Результати**. На основі запропонованого методу вибору складу параметрів для оцінювання продуктивності досліджуваних фреймворків проведено експерименти, що передбачали: застосування методу сегментування вхідної інформації на основі розділення вхідного файлу на абзаци (рядки) для різних значень діапазонів кількості слів та кількості літер у кожному слові; налаштування основних параметрів та специфічних, зокрема партиціонування та паралелізму з огляду на характеристики віртуального середовища та локального ресурсу. За досягнутими результатами детально проаналізовано запропоновані методи, впроваджені для покращення продуктивності досліджуваних фреймворків із рекомендаціями вибору оптимальних значень параметрів сегментування даних та конфігураційних параметрів. **Висновки**. Упровадження запропонованих методів налаштування конфігураційних параметрів *Spark* та *Hadoop* дає змогу підвищити продуктивність оброблення даних: для невеликих файлів (0,5–1 ГБ) у середньому до 25–30%; для великих (1,5–2,5 ГБ) – у середньому до 10–20%. Водночас середнє значення часу виконання одного завдання зменшилося на 10–15% для файлів різних розмірів та з різною кількістю слів у рядку.

Ключові слова: фреймворк; вхідний файл; сегментування; тестові дані; генератор даних; час виконання; конфігураційні параметри; *Spark*; *Hadoop*; *MapReduce*.

Актуальність дослідження

З настанням ери великих даних технології їх оброблення в останні роки привертають все більше уваги з боку науковців, світового бізнесу тощо [1]. Наприклад, *Google* пропонує три програмні технології для масового зберігання мультимедійних даних: *Google File System (GFS)*, *MapReduce* та *BigTable* [2]. Традиційна обчислювальна модель в епоху великих даних вже не відповідає вимогам до продуктивності та ефективності їх використання. Отже, *Apache Spark* [3], *Apache Hadoop* [4], *Apache Storm* [5] та інші

розподілені фреймворки натеper набули значного поширення завдяки потужним механізмам щодо оброблення значних обсягів інформації. Серед цих фреймворків *Apache Spark* став найбільш популярною та універсальною платформою для оброблення великих даних завдяки своїй продуктивності та значній підтримці прикладних сценаріїв використання.

Щодо аналізу великих даних, то потреба в інфраструктурі, здатній обробляти значні обсяги інформації за прийнятний час і з обмеженими ресурсами, є значною проблемою. Можливі рішення передбачають використання технологій паралельних

і розподілених обчислень. Прикладом застосування таких технологій є *Hadoop* – екосистема для реалізації паралельного програмування та розподіленого зберігання інформації. Однією з основних переваг використання *Hadoop* є те, що можна об'єднати процеси зберігання та оброблення інформації [6].

Одним із сучасних світових напрямів щодо використання високопродуктивних систем є застосування віртуальних середовищ для оброблення великих даних, що позначилося на розвитку технологій віртуалізації, упроваджених на хмарних платформах. Поряд із цим світовим трендом набули значного розвитку методи та технології використання віртуалізації в планувальниках для оброблення значних обсягів інформації [7, 8]. Хоча існує певний потенціал низької продуктивності та високого навантаження, віртуальне середовище може бути застосовано для моделювання роботи фреймворків та розроблення напрямів з метою збільшення рівня використання наявних системних ресурсів, полегшення управління системою, а також підвищення надійності та оптимізації енергозбереження.

Отже, постає необхідність **загального розв'язання** зазначених проблем і пов'язаної з ними низки часткових завдань щодо використання сучасних фреймворків оброблення та зберігання великих даних та підвищення їх продуктивності в умовах застосування віртуальних середовищ на обмежених обчислювальних потужностях локальних ресурсів.

Стислий огляд і аналіз фреймворків оброблення великих даних (*Big Data*). Аналіз публікацій та визначення завдань

Аналіз стану проблеми буде проведено на основі фреймворків *Apache Spark* та *Hadoop*.

Apache Spark

Apache Spark має понад 150 конфігураційних параметрів, які можуть бути налаштовані користувачами відповідно до їхніх власних застосунків, щоб оптимізувати продуктивність фреймворку [3]. З одного боку, великий простір параметрів надає чимало можливостей для підвищення продуктивності завдяки ретельному налаштуванню конфігураційних параметрів, особливо щодо визначення складу найбільш впливових параметрів, а з іншого – приводить до необхідності визначення та врахування досить складних взаємодій (кореляцій, залежностей) між цими параметрами. Через необґрунтоване

(або ж не доведене експериментальним чином конфігурації, зокрема за допомогою евристики) налаштування параметрів продуктивність *Spark*-застосунків доволі складно забезпечити відповідно до теоретичних значень параметрів, прийнятих за замовчуванням. Тому розроблення способів оптимізації продуктивності *Spark*-застосунків є актуальною проблемою, що заслуговує на ґрунтовні дослідження.

Apache Hadoop

Apache Hadoop – це програмний фреймворк із відкритим вихідним кодом, що реалізує обчислювальну модель *MapReduce*, яка підтримує надійні та масштабовані обчислення великих даних [9]. Фреймворк написаний мовою *Java* і містить такі основних модулі: *Hadoop Common*, *Hadoop Distributed File System*, *Yarn* та *MapReduce* [10, 11]. *Yarn* – звичайна обчислювальна тканина для підтримки *MapReduce* та застосунків в межах кластера *Hadoop*. *Yarn* дозволяє декільком застосункам працювати одночасно на спільному кластері й дає змогу їм узгоджувати ресурси за необхідністю [12]. Політики планування, що використовуються в системі *Hadoop YARN*, містять *FIFO*, *Fair* та *Capacity*. За політикою *FIFO* всі завдання, що очікують на виконання, сортуються в неспадному порядку за часом їх надходження. Усі запити на завдання від кожної вхідної роботи будуть впорядковані за їх пріоритетами, а також за розташуванням. При цьому, планувальники завдань по-різному впливають на продуктивність обчислень. Планувальник *FIFO* потребує більше часу для оброблення завдання порівняно з планувальниками *Fair* і *Capacity*, тоді як у планувальника *Fair* пропускна спроможність і час оброблення майже однаковий. Планувальник *Capacity* потребує більше часу виконання порівняно з планувальником *Fair*, тоді як планувальник *Fair* витрачає менше часу на завершення завдання порівняно з *FIFO*-планувальником. Оскільки планувальник *Capacity* використовує пропускну спроможність черги завдань, може статися так, що черги з меншою пропускною спроможністю вимагають більшого часу на виконання завдання. Планувальник *Fair* обробляє більше даних за секунду порівняно з планувальниками *Capacity* та *FIFO*. Емпіричне дослідження за такими планувальниками наведено в роботі [13]. У планувальнику *FIFO* завдання подаються в одну чергу й виконуються послідовно. Для призначення завдань планувальник *FIFO* дотримується чіткого порядку виконання завдань. Недоліком цього

планувальника є те, що "жорсткий" порядок завдань *FIFO* зменшує локальність даних, і наступні завдання у черзі призначаються вузлам тільки після завершення попереднього завдання. У роботі [14] реалізовано дві політики *Fair* планування в *Hadoop YARN*: справедлива (*Fair*) та домінантна (*DRF*). *Fair* політика бере до уваги лише використання пам'яті кожним завданням і намагається призначити рівну пам'ять, тоді як політика *DRF* спрямована на те, щоб гарантувати, що всі завдання отримують у середньому рівну частку домінантних вимог до ресурсів (наприклад, пам'яті чи пам'яті або ядер процесорів). Політика пропускнуї спроможності працює подібно до політики справедливості. За цією політикою планувальник намагається зарезервувати гарантовану потужність для кожного завдання і замовляє ці завдання відповідно до їх дефіциту (тобто розриву між очікуваною та фактичною пропускнуї спроможністю). У статті [14] автори запропонували нову систему класифікації для планувальників завдань, розділивши їх на три окремі групи: планувальники завдань для зменшення кількості відсталих завдань, планувальники завдань для покращення локалізації даних та планувальники завдань для оптимізації використання ресурсів. У роботі [15] увагу зосереджено на алгоритмах планування завдань у середовищі *Hadoop Big Data*. Автори наголошують на важливості ефективного планування завдань у процесі оброблення великих обсягів даних в реальному часі, зважаючи на обмеження традиційних алгоритмів планування.

Hadoop MapReduce – парадигма паралельного програмування, що досліджується в роботах [16–18]. Модулі *MapReduce* налаштовуються за допомогою конфігурації параметрів, які в сукупності визначають та забезпечують продуктивність, що надається застосункам. У роботах [19, 20] наведено результати проведених експериментів щодо аналізу продуктивності етапів реалізації *MapReduce* та рекомендацій щодо покращення продуктивності технологій *MapReduce*.

Технології віртуалізації для кластерів *Apache Spark*

Вимоги до продуктивності застосування віртуальних середовищ у використанні фреймворків детально наведено та проаналізовано в працях [21–24].

Таким чином, виникає необхідність вирішення питань щодо вибору складу та налаштувань

конфігураційних параметрів розглянутих фреймворків з врахуванням обмежень наявних обчислювальних ресурсів, зокрема, при розгортанні у віртуальних середовищах, що дозволить на основі отриманих результатів розробити рекомендації для підвищення їх продуктивності.

Метою статті є підвищення продуктивності режимів розгортання *Apache Spark* та *Apache Hadoop* на основі методу, що містить передпроцесного сегментування вхідних даних та налаштування основних і спеціальних (додаткових) конфігураційних параметрів, що беруть до уваги обмеження віртуального середовища та локального ресурсу.

Матеріали та методи.

Створення синтезованого набору тестових даних

WordCount

Було обрано один з універсальних наборів тестових даних *WordCount*, які застосовуються для тестування фреймворків значних обсягів інформації [7, 25, 26]. Сегментування вхідних даних за абзацами (рядками) здійснено за допомогою програми, розробленої мовою *Python*, на основі випадкових чисел із визначеною кількістю слів в абзаці та різною кількістю літер у кожному слові. Це дало змогу згенерувати 100 000 варіантів сегментованого тексту за мінімальні проміжки часу генерації та відповідно до вимог до розмірів файлів тестових даних.

У табл. 1 наведено розміри тестового файлу, кількість слів в абзаці (рядку) тексту, кількість завдань (*tasks*), розрахованих для кожного тестового файлу відповідно до розміру блоку в системі *HDFS* (128 МБ) [4, 9]. Характеристики обчислювального середовища локального ресурсу для проведення експериментів подано в табл. 2. Програмне забезпечення віртуальної машини на локальному ресурсі: *Oracle VM VirtualBox v.7.0*; *ОС Ubuntu Xenial 16.04 LTS*, ОП – 6 ГБ; віртуальних ядер – 4.

Таблиця 1. Кількість завдань у вхідних файлах

Розмір файлу, ГБ	Кількість завдань	Кількість слів в абзаці (рядку), діапазони
0,5	4	100–150; 150–200; 200–300
1	8	100–150; 150–200; 200–300
1,5	12	100–150; 150–200; 200–300
2	16	100–150; 150–200; 200–300
2,5	20	100–150; 150–200; 200–300

Таблиця 2. Характеристики обчислювального середовища локального ресурсу

CPU Type	Intel Core i5 8265U
#Cores	4 cores@ 1.60GHz
#Threads	8 threads
#Sockets	Socket 1356 FCBGA
L1 DCache	4 x 32KB, 8-way associative, 64 byte/line
L1 ICache	4 x 32KB, 8-way associative, 64 byte/line
L2 Cache	4x 256 KB, 4-way associative, 64 byte/line
L3 Cache	L3 Cache 6 MB, 12-way associative, 64 byte/line
Memory	8 GB DDR4
Network	100 MB Ethernet link

**Склад конфігураційних параметрів та їх налаштувань для *Spark* і *Hadoop Map Reduce*.
Моделювання режимів *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn FIFO***

На основі проведеного аналізу щодо визначення найбільш впливових параметрів налаштувань

досліджуваних фреймворків у розглянутих режимах [27] обрано склад, наведений у табл. 3.

Для подальшого дослідження проведено статистичний аналіз результатів моделювання роботи режимів *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn FIFO* для різних розмірів вхідних файлів та кількості слів у абзаци (рядку) сегментованого тексту (табл. 4–6) за репрезентативною кількістю проведених випробувань, яка дорівнювала 10 експериментам. Для порівняльного аналізу використано такі статистичні показники: МО часу виконання \pm С.К.В за кожним режимом та відношення значень цих показників для різних режимів з метою визначення зростання продуктивності (часу виконання завдань) за допомогою розрахунку значення $МО \pm$ С.К.В. як відношення $МО_СКВ Standalone$ до $МО_СКВ Yarn$. Для цього застосовано такі визначення: МО – математичне очікування; С.К.В. – середньоквадратичне відхилення. Наведені обчислення є результатами застосування запропонованих налаштувань згідно з табл. 3.

Таблиця 3. Найбільш впливові параметри налаштувань досліджуваних фреймворків

<i>Hadoop</i>			<i>Spark</i>		
Параметр	Значення за замовчуванням	Налаштоване значення	Параметр	Значення за замовчуванням	Налаштоване значення
dfs.block.size	128 МБ	128 МБ	dfs.block.size	128 МБ	128 МБ
dfs.replication	3	1	dfs.replication	3	1
mapreduce.reduce.java.opts	1024	1638	SPARK_DRIVER_MEMORY	512 МБ	1 ГБ
mapreduce.map.cpu.vcores	2	4	SPARK_WORKER_INSTANCES	1	2
mapreduce.reduce.cpu.vcores	1	4	SPARK_WORKER_CORES	All available	4
mapreduce.reduce.shuffle.parallelcopies	5	5	SPARK_EXECUTOR_INSTANCES	2	2
mapreduce.task.io.sort.mb	100 МБ	100 МБ	SPARK_EXECUTOR_MEMORY	1 ГБ	1 ГБ
yarn.scheduler.maximum-allocation-mb	8192 МБ	4096 МБ	SPARK_EXECUTOR_CORES	1	1
sort.spill.percent	80%	80%	spark.shuffle.compress	true	true
mapreduce.map.memory.mb	1024	4096	spark.shuffle.spill.compress	true	true
mapreduce.reduce.memory.mb	1024	4096	spark.shuffle.file.buffer	32 КБ	48 КБ
yarn.app.mapreduce.am.resource.mb	1536	4096	spark.memory.fraction	0.6	0.4
yarn.nodemanager.resource.memory-mb	8192	4096	spark.memory.storageFraction	0.5	0.6
			spark.rdd.compress	true	true
			spark.io.compression.code	lz4	lz4
			spark.default.parallelism	4	4–100
			spark.sql.shuffle.partitions	4	4
			spark.task.cpus	1	2

Таблиця 4. Результати розрахунків для кількості слів у рядку 150–200

Розмір, ГБ	Кількість завдань	МО_СКВ Standalone	Середній час виконання 1 завдання, с, Standalone	МО_СКВ Yarn	Середній час виконання 1 завдання, с, Yarn	МО ±С.К.В. відношення
0.5	4	88.549±0.936	22	72.588±1.292	18	1.25±0.025
1	8	126.559±1.336	15,75	115.7374±0.525	14,75	1.092±0.013
1.5	12	168.593±1.252	14	151.026±2.72	12,6	1.1237±0.022
2	16	221.695±1.399	13,8	203.078±0.826	12,7	1.09163±0.082
2.5	20	265.94±0.829	13,25	240.382±1.308	12	1.10895±0.0069

Таблиця 5. Результати розрахунків для кількості слів у рядку 100–150

Розмір, ГБ	Кількість завдань	МО_СКВ Standalone	Середній час виконання 1 таска, с, Standalone	МО_СКВ Yarn	Середній час виконання 1 таска, с, Yarn	МО ±С.К.В. відношення
0.5	4	87.02±0.632	21,75	67.803±0.920	16,75	1.303±0.02
1	8	132.54±0.652	16,5	119.569±0.594	14,9	1.1025±0.0077
1.5	12	194.44±0.624	16,2	172.915±0.916	14,33	1.1268±0.007
2	16	230.19±0.632	14,38	210.177±0.852	13,12	1.097±0.0054
2.5	20	265.02±0.631	13,25	253.15±0.632	12,65	1.047±0.0037

Таблиця 6. Результати розрахунків для кількості слів у рядку 200–300

Розмір, ГБ	Кількість завдань	МО_СКВ Standalone	Середній час виконання 1 завдання, с, Standalone	МО_СКВ Yarn	Середній час виконання 1 завдання, с, Yarn	МО ± С.К.В. відношення
0.5	4	94.85±0.678	23,5	66.604±1.871	16,5	1.525±0.0412
1	8	158.334±0.633	19,75	123.035±0.515	15,4	1.289±0.0074
1.5	12	204.922±0.951	17	174.231±0.468	14,5	1.177±0.0063
2	16	327.479±0.474	20,43	212.509±0.557	13,25	1.542±0.0046
2.5	20	338.079±0.748	16,9	255.299±0.595	12,75	1.325±0.00426

На рис. 1–3 наведено графіки залежності часу оброблення вхідних файлів для різних режимів розгортання *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn* (за

замовчуванням), на рис. 4–6 – з використанням запропонованих налаштувань конфігураційних параметрів для різної кількості слів в абзаци (рядку).

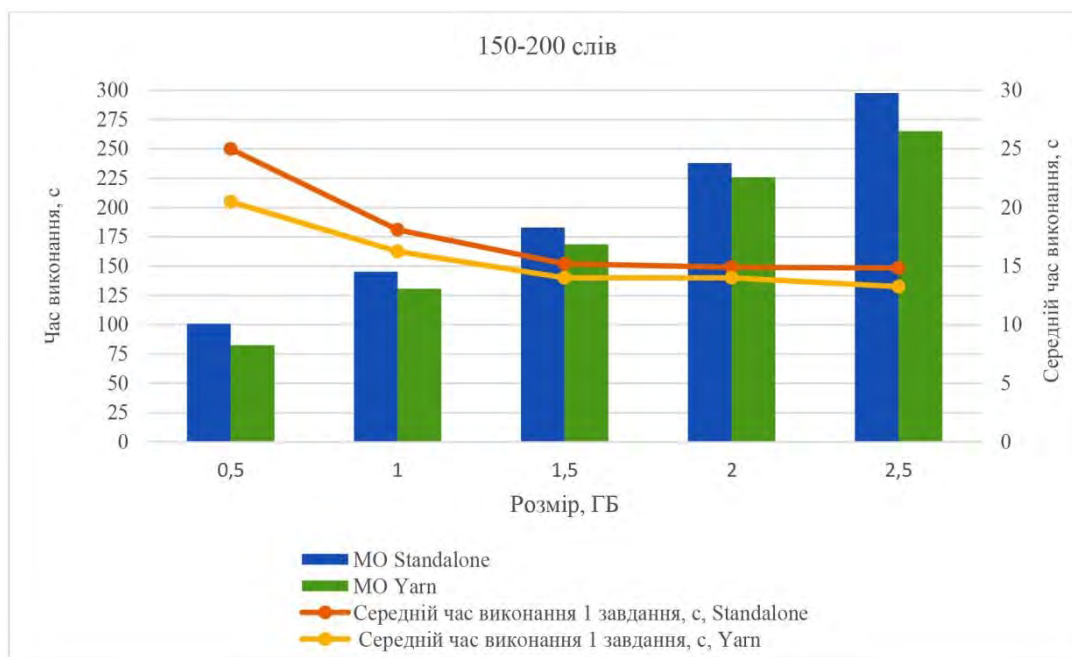


Рис. 1. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (150–200 слів)

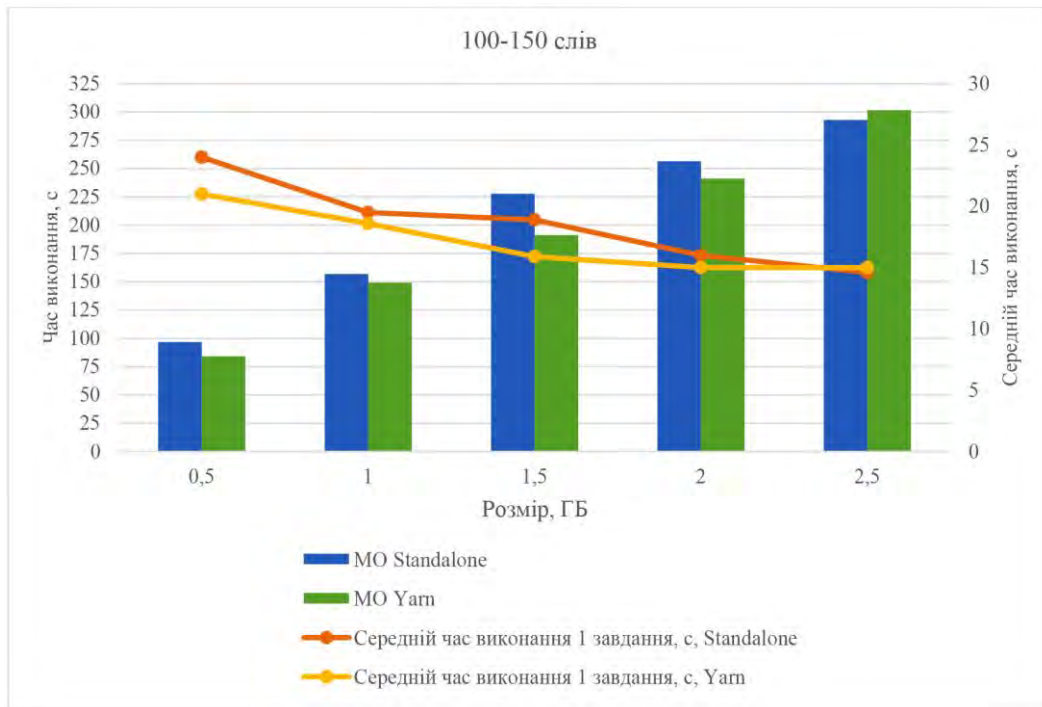


Рис. 2. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (100–150 слів)

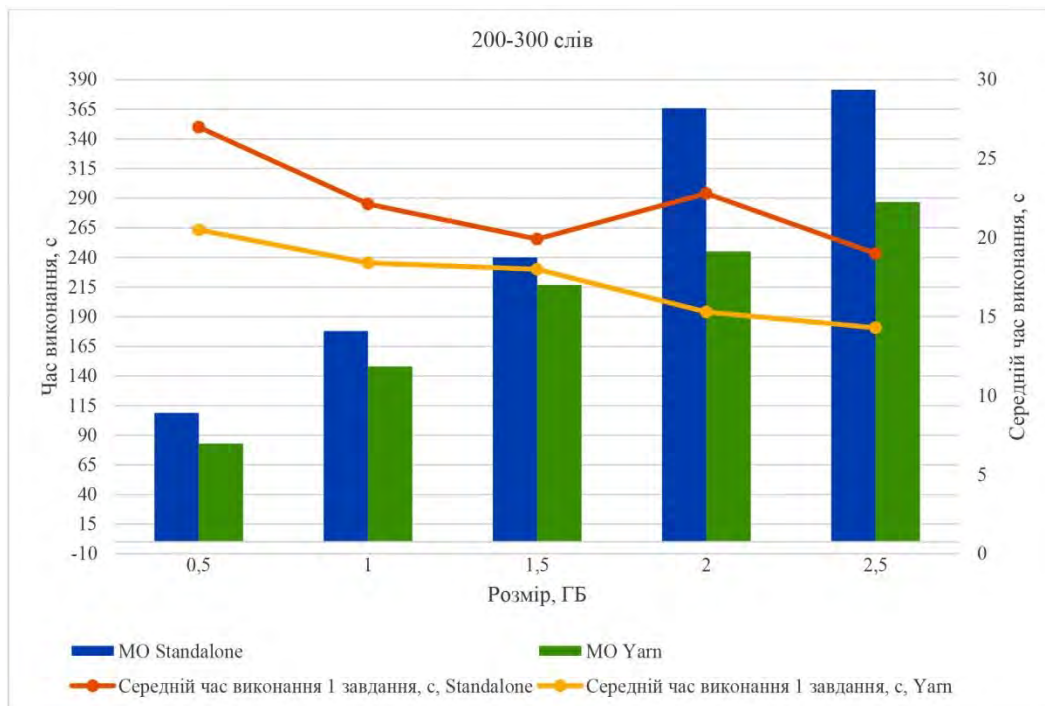


Рис. 3. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (200–300 слів)

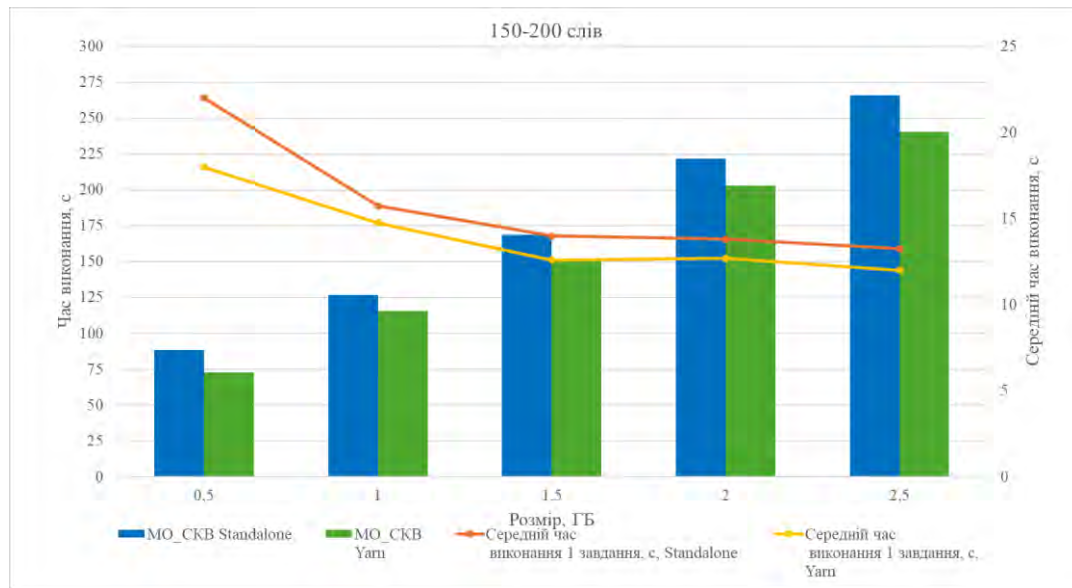


Рис. 4. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (150–200 слів)

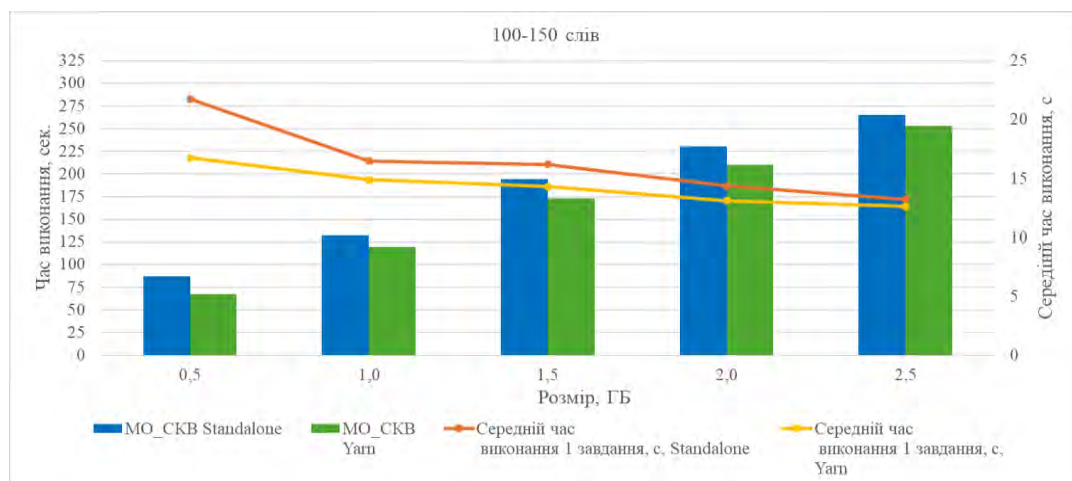


Рис. 5. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (100–150 слів)

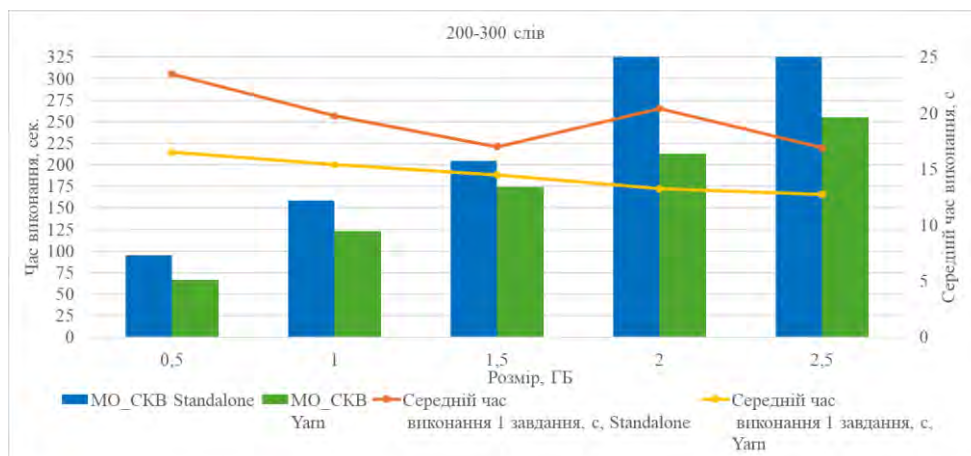


Рис. 6. Залежність часу оброблення вхідного файлу та середнього часу виконання завдання від розмірності вхідного файлу для різних режимів (200–300 слів)

Порівняльний аналіз зроблено для налаштованих значень конфігураційних параметрів для режимів *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn FIFO*.

Аналіз наведених результатів показує, що найбільш прийнятним щодо продуктивності є сегментування вхідного файлу в діапазоні 150–200 слів у рядку та застосування запропонованих налаштувань параметрів (див. табл. 3), що загалом сприяло підвищенню продуктивності оброблення: для невеликих файлів (0,5–1 ГБ) у середньому до 25–30%; для великих (1,5–2,5 ГБ) – у середньому до 10–20%. У цьому разі середнє значення часу виконання одного завдання зменшилося на 10–15% для файлів різних розмірів та з різною кількістю слів у рядку.

Аналіз впливу налаштувань конфігураційних параметрів розбиття та паралелізму

Унаслідок того, що в цьому дослідженні, на відміну від режиму *Single Node*, який передбачає використання одновузлового кластера, кластери *Spark Standalone* і *Hadoop Yarn FIFO* розгорнуті на трьох вузлах у віртуальному середовищі. Це визначає можливість використання додаткових конфігураційних параметрів – паралелізму і партиціонування,

що підвищить продуктивність і масштабованість застосунків. Паралелізм дає змогу виконувати кілька завдань одночасно для одного вхідного файлу. Це означає, що замість послідовного оброблення інформації на одному вузлі можна розподілити завдання між трьома доступними вузлами з допомогою зміни *mapreduce.map.cpu.vcores* (*Hadoop*) і *spark.task.cpus* (*Spark*), що прискорить час виконання. Партиціонування (*partitions*) розподіляє дані на логічні підмножини, що обробляються незалежно одна від одної. Це дає змогу розподілити навантаження між вузлами кластера та збільшити швидкість оброблення даних. *Spark* автоматично визначає кількість партицій, але для оптимізації продуктивності їх можна змінити вручну.

Для обґрунтування впливу налаштувань цих параметрів було змінено значення *Spark.task.cpus* та *Parallelism* у відповідних файлах налаштувань для режимів *Standalone* і *Hadoop Yarn FIFO* для різних розмірів вхідних файлів. Результати проведених експериментів для режиму *Standalone* наведено в табл. 7–9.

Як видно з наведених графіків, досягнуто **синергетичний ефект** запропонованих налаштувань завдяки динамічній зміні одночасно двох параметрів – *Spark.task.cpus* та *Parallelism*.

Таблиця 7. Результати розрахунків часу для кількості слів у рядку 150–200

Розмір файлу, ГБ	Spark.task.cpus	Parallelism=4	Spark.task.cpus	Parallelism=16
0,5	1	83.08	2	80.08
1	1	120.13	2	117.92
1,5	1	161.06	2	148.5
2	1	209.81	2	200.13
2,5	1	250.89	2	239.35

Таблиця 8. Результати розрахунків часу для кількості слів у рядку 100–150

Розмір файлу, ГБ	Spark.task.cpus	Parallelism=4	Spark.task.cpus	Parallelism=16
0,5	1	84.1	2	80.93
1	1	127.99	2	120.47
1,5	1	190.78	2	181.66
2	1	225.91	2	216.12
2,5	1	260.03	2	240.33

Таблиця 9. Результати розрахунків часу для кількості слів у рядку 200–300

Розмір файлу, ГБ	Spark.task.cpus	Parallelism=4	Spark.task.cpus	Parallelism=16
0,5	1	88.67	2	80.89
1	1	148.49	2	146.17
1,5	1	197.12	2	197.01
2	1	310.33	2	311.07
2,5	1	330.6	2	327.9

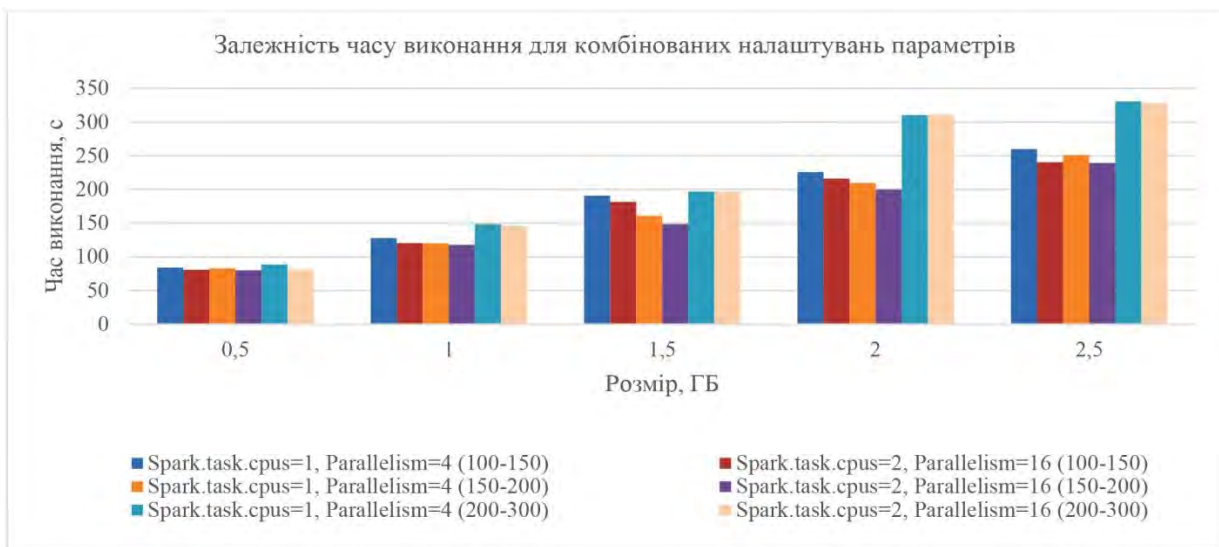


Рис. 7. Залежність часу виконання для комбінованих налаштувань параметрів для режиму *Standalone*

Висновки

З метою визначення та обґрунтування впливу масштабованості розмірів вхідної інформації створено синтезований набір тестових даних *WordCount* для використання методів сегментування вхідної інформації, що надходить для оброблення. Структура та характеристики тестів дають змогу використовувати результати оброблення інформації з динамічною структурою для збільшення продуктивності процесів оброблення великих даних. Це можна зробити з допомогою передпроцесної обробки даних на основі методів сегментування за абзацами (рядками, реченнями) за заданими діапазонами кількості рядків та слів у структурних елементах тексту.

Результати дослідження свідчать про ефективність запропонованих налаштувань основних та специфічних (додаткових) конфігураційних параметрів для кластерів *Spark Standalone* та *Hadoop Yarn FIFO*. У роботі обґрунтовано фактори, що впливають на актуальність окресленого питання. Вони полягають у використанні результатів моделювання роботи надпродуктивних кластерів в умовах обмежених обчислювальних ресурсів (віртуальних середовищ), налаштування яких потребує зважати на характеристики локального ресурсу (пам'ять, тип процесора, обсяг та організація кеш-пам'яті тощо). Це спричиняє обмеження щодо складу основних і додаткових конфігураційних параметрів, які впливають на загальну продуктивність системи. З допомогою експериментів обґрунтовано рекомендації щодо вибору діапазонів можливих змін значень параметрів в умовах обмеженості ресурсів,

які визначаються спроможністю масштабувати ресурси та завдання. Запропоновано зміни додаткових параметрів налаштувань, що пов'язані з наявністю певних зв'язків між параметрами для підвищення продуктивності кластерів, зокрема рівнем розбиття даних, кількістю завдань для одного ядра, та відповідно до цього – рівня паралелізму. Результати, досягнуті для *Hadoop Yarn*, показали, що в окремих випадках збільшення кількості завдань для одного ядра не покращує продуктивність через обмеженість віртуальної машини або неможливість збільшити паралельне виконання потоків завдань (мініпотоків) на одному ядрі обчислювальної системи через архітектуру системи.

Практичне використання досягнутих результатів полягає в застосуванні напрямів та стратегій щодо вдосконалення методів вибору та налаштувань конфігураційних параметрів високопродуктивних фреймворків на основі детального аналізу зв'язків між параметрами з огляду на обмеження та умови їх розгортання та налаштування на наявних ресурсах.

Подальші напрями досліджень будуть спрямовані на побудову математичних моделей з метою визначення можливих варіантів комбінацій загальних і специфічних конфігураційних параметрів та їх налаштувань для створення сценаріїв підвищення продуктивності фреймворків в умовах масштабованості та з використанням різноманітних тестів для оброблення великих даних. Розроблений метод сприятиме розвитку методологічних засад для збільшення продуктивності сучасних технологій та інструментів оброблення великих даних.

Список літератури

1. Borthakur D. Petabyte scale databases and storage systems at Facebook. *SIGMOD '13: Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. 2013. P. 1267–1268. DOI: <https://doi.org/10.1145/2463676.2463713>
2. Survey A. Past, Present and Future of Hadoop / A. Zarei et al. *Computer Science, Networking and Internet Architecture*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13293>
3. Apache Spark Unified engine for large-scale data analytics. URL: <http://spark.apache.org/>
4. Apache Hadoop. URL: <https://hadoop.apache.org/>
5. Apache Storm. URL: <https://storm.apache.org/2024/02/02/storm261-released.html>
6. Polato I. A Comprehensive View of Hadoop Research – A Systematic Literature Review. / I. Polato et al. *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. Vol. 46. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.07.022>
7. Jeyaraj R., Ananthanarayana V. S., Paul A. Fine-grained data-locality aware MapReduce job scheduler in a virtualized environment. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Vol. 11. 2020. P. 4261–4272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01707-7>
8. Ibrahim S., Lu L., Qi L. Evaluating MapReduce on virtual machines: The Hadoop case. *IEEE International Conference on Cloud Computing*. Vol. 5931. 2009. P. 519–528. DOI: [10.1007/978-3-642-10665-1_47](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10665-1_47)
9. White T. Hadoop: The definitive guide. O'Reilly Media, Inc. 2012. URL: https://www.academia.edu/34540716/Hadoop_The_Definitive_Guide
10. Vavilapalli V. K. Apache Hadoop YARN: Yet Another Resource Negotiator. / V. K. Vavilapalli et al. *SOCC '13: Proceedings of the 4th annual Symposium on Cloud Computing*. 2013. No 5. P. 1–16. DOI: [10.1145/2523616.2523633](https://doi.org/10.1145/2523616.2523633)
11. Yi Yao New Scheduling Algorithms for Improving Performance and Resource Utilization in Hadoop YARN Clusters. / Yi Yao et al. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2019. Vol. 9. № 3. P. 1158–1171. DOI: [10.1109/TCC.2019.2894779](https://doi.org/10.1109/TCC.2019.2894779)
12. Perwej Y. An Empirical Exploration of the Yarn in Big Data. / Y. Perwej et al. *International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS)*. 2017. Vol. 12. № 9. P. 19–29. DOI: [10.5120/ijais2017451730](https://doi.org/10.5120/ijais2017451730)
13. J. V. Gautam Empirical Study of Job Scheduling Algorithms in Hadoop MapReduce. / J. V. Gautam et al. *Cybernetics and Information Technologies*. 2017. Vol. 17. No 1. P. 146–163. DOI: [10.1515/cait-2017-0012](https://doi.org/10.1515/cait-2017-0012)
14. R. Ghazali A classification of Hadoop job schedulers based on performance optimization approaches. / R. Ghazali et al. *Cluster Computing*. 2021. Vol. 24. Issue 4. P. 3381–3403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03339-8>
15. A. A. Abdallat Hadoop MapReduce Job Scheduling Algorithms Survey and Use Cases. / A. A. Abdallat et al. *Modern Applied Science*. 2019. Vol. 13. No. 7. P. 38–48. DOI: [10.5539/mas.v13n7p38](https://doi.org/10.5539/mas.v13n7p38)
16. Abdul H. S. An overview on Big Data and Hadoop. *International Journal of Computer Applications*. Vol. 154. Number 10. 2016. P. 29–35. DOI: [10.5120/ijca2016912241](https://doi.org/10.5120/ijca2016912241)
17. S. Hedayati MapReduce scheduling algorithms in Hadoop: a systematic study. / S. Hedayati et al. *Journal of Cloud Computing*. 2023. Vol. 12. Issue 1. P. 1–30. DOI: [10.1186/s13677-023-00520-9](https://doi.org/10.1186/s13677-023-00520-9)
18. M. Pastorelli Practical Size-based Scheduling for MapReduce Workloads. / M. Pastorelli et al. *Computer Science, Distributed, Parallel, and Cluster Computing*. 2013. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1302.2749>
19. Herodotou H., Babu S. Profiling, What-if Analysis, and Cost-based Optimization of MapReduce Programs. *Proceedings of the VLDB Endowment*. Vol. 4. Issue 11. 2011. P. 1111–1122. DOI: [10.14778/3402707.3402746](https://doi.org/10.14778/3402707.3402746)
20. H. Chang Scheduling in Mapreduce-Like Systems for fast completion time. / H. Chang et al. *NFOCOM 2011. 30th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2011.5935152>
21. High-Performance Virtualized Spark Clusters on Kubernetes for Deep Learning. Performance Study. 2021. URL: <https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/performance/spark-k8s-vsphere67-perf.pdf>
22. Q. Zhang A Comparative Study of Containers and Virtual Machines in Big Data Environment. / Q. Zhang et al. 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.01842.pdf>
23. S. A. Babu System performance evaluation of para virtualization, container virtualization, and full virtualization using Xen, Openvz, And Xenserver. / S. A. Babu et al. *In Advances in Computing and Communications (ICACC)*. 2014. P. 247–250. DOI: [10.1109/ICACC.2014.66](https://doi.org/10.1109/ICACC.2014.66)
24. J. Bhimani Accelerating big data applications using lightweight virtualization framework on enterprise cloud. / J. Bhimani et al. *In High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. 2017. P. 1–7. DOI: [10.1109/HPEC.2017.8091086](https://doi.org/10.1109/HPEC.2017.8091086)
25. Issa J. Performance Evaluation and Estimation Model Using Regression Method for Hadoop Word Count. *IEEE Access*. Vol. 3. 2015. P. 2784–2793. DOI: [10.1109/ACCESS.2015.2509598](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2509598)
26. Benlachimi Y., Yazidi A. El, Hasnaoui M. L. A Comparative Analysis of Hadoop and Spark Frameworks using Word Count Algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. Vol. 12. No. 4. 2021. P. 778–788. DOI: [10.14569/IJACSA.2021.0120495](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120495)
27. Jayanthi M., Mohan R. K. R. Experimental Setup of Apache Spark Application Execution in a Standalone Cluster Environment using Default Scheduling Mode. *2022 International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. IEEE. 2022. P. 984–988. DOI: [10.1109/ICACRS55517.2022.10029155](https://doi.org/10.1109/ICACRS55517.2022.10029155)

References

1. Borthakur, D. (2013), "Petabyte scale databases and storage systems at Facebook", *SIGMOD '13: Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 2013. P. 1267–1268. DOI: <https://doi.org/10.1145/2463676.2463713>
2. Zarei, A., Safari, S., Ahmadi, M., Mardukhi F. (2022), "Past, Present and Future of Hadoop: A Survey". 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13293>
3. Apache Spark. Unified engine for large-scale data analytics. available at: <http://spark.apache.org/>
4. Apache Hadoop. available at: <https://hadoop.apache.org/>
5. Apache Storm. available at: <https://storm.apache.org/2024/02/02/storm261-released.html>
6. Polato, I., Ré, R., Goldman, A., Kon F. (2014), "A Comprehensive View of Hadoop Research – A Systematic Literature Review", *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 46. P. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2014.07.022>
7. Jeyaraj, R., Ananthanarayana, V. S., Paul, A. (2020), "Fine-grained data-locality aware MapReduce job scheduler in a virtualized environment", *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. Vol. 11. P. 4261–4272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01707-7>
8. Ibrahim, S., Lu, L., Qi, L. (2009), "Evaluating MapReduce on virtual machines: The Hadoop case", *IEEE International Conference on Cloud Computing*, 2009. Vol. 5931. P. 519–528. DOI: [10.1007/978-3-642-10665-1_47](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10665-1_47)
9. White, T. "Hadoop: The definitive guide". O'Reilly Media, Inc. 2012. available at: https://www.academia.edu/34540716/Hadoop_The_Definitive_Guide
10. Vavilapalli, V. K., Murthy, A. C., Douglass, C., Agarwal, S., Konar, M., Evansy, R., Gravesy, T., Lowey, J., Shahh, H., Sethh, S., Sahah, B., Curinom, C., O'Malley, O., Radiah, S., Reedf, B., Baldeschwieler, E. (2013), "Apache Hadoop YARN: Yet Another Resource Negotiator", *SOCC '13: Proceedings of the 4th annual Symposium on Cloud Computing*, 2013. No 5. P. 1–16. DOI: [10.1145/2523616.2523633](https://doi.org/10.1145/2523616.2523633)
11. Yao, Y., Gao, H.; Wang, J., Sheng, B., Mi, N. (2019), "New Scheduling Algorithms for Improving Performance and Resource Utilization in Hadoop YARN Clusters", *IEEE Transactions on Cloud Computing*. Vol. 9. №. 3. P. 1158–1171. DOI: [10.1109/TCC.2019.2894779](https://doi.org/10.1109/TCC.2019.2894779)
12. Perwej, Y., Kerim, B., Adrees, M. S., Sheta, O. E. (2017), "An Empirical Exploration of the Yarn in Big Data", *International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS)*. Vol. 12. № 9. P. 19–29. DOI: [10.5120/ijais2017451730](https://doi.org/10.5120/ijais2017451730)
13. Gautam, J. V., Prajapati, H. B., Dabhi, V. K., Chaudhary, S. (2017), "Empirical Study of Job Scheduling Algorithms in Hadoop MapReduce", *Cybernetics and Information Technologies*. Vol. 17. No 1. P. 146–163. DOI: [10.1515/cait-2017-0012](https://doi.org/10.1515/cait-2017-0012)
14. Ghazali, R., Adabi, S., Down, D. G., Movaghar, A. (2021), "A classification of Hadoop job schedulers based on performance optimization approaches", *Cluster Computing*. Vol. 24. Issue 4. P. 3381–3403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-021-03339-8>
15. Abdallat, A. A., Arwa, I. A., Duaa, A. A., amimi, AlWidian, J. A. (2019), "Hadoop MapReduce Job Scheduling Algorithms Survey and Use Cases", *Modern Applied Science*. Vol. 13. No. 7. P. 38–48. DOI: [10.5539/mas.v13n7p38](https://doi.org/10.5539/mas.v13n7p38)
16. Abdul, H. S. (2016), "An overview on Big Data and Hadoop", *International Journal of Computer Applications*. Vol. 154. Number 10. P. 29–35. DOI: [10.5120/ijca2016912241](https://doi.org/10.5120/ijca2016912241)
17. Hedayati, S., Maleki, N., Olsson, T., Ahlgren, F., Seyednezhad, M., Berahmand, K. (2023), "MapReduce scheduling algorithms in Hadoop: a systematic study", *Journal of Cloud Computing*. Vol. 12. Issue 1. P. 1–30. DOI: [10.1186/s13677-023-00520-9](https://doi.org/10.1186/s13677-023-00520-9)
18. Pastorelli, M., Barbuzzi, A., Carra, D., Dell'Amico, M., Michiardi, P. (2013), "Practical Size-based Scheduling for MapReduce Workloads". 12 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1302.2749>
19. Herodotou, H., Babu, S. (2011), "Profiling, What-if Analysis, and Cost-based Optimization of MapReduce Programs", *Proceedings of the VLDB Endowment*. Vol. 4. Issue 11. P. 1111–1122. DOI: [10.14778/3402707.3402746](https://doi.org/10.14778/3402707.3402746)
20. Chang, H., Kodialam, M., Kompella, R. R., Lakshman, T. V., Lee, M., Mukherjee, S., (2011), "Scheduling in Mapreduce-Like Systems for fast completion time", *NFOCOM 2011. 30th IEEE International Conference on Computer Communications, Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2011.5935152>
21. "High-Performance Virtualized Spark Clusters on Kubernetes for Deep Learning. Performance Study". 2021. available at: <https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/performance/spark-k8s-vsphere67-perf.pdf>
22. Zhang, Q., Liu, L., Pu, C., Dou, Q., Wu, L., Zhou, W. "A Comparative Study of Containers and Virtual Machines in Big Data Environment". 2018. available at: <https://arxiv.org/pdf/1807.01842.pdf>
23. Babu, S. A., Hareesh, M. J., Martin, J. P., Cherian, S., Sastri, Y. (2014), "System performance evaluation of para virtualization, container virtualization, and full virtualization using Xen, Openvz, And Xenserver", *In Advances in Computing and Communications (ICACC)*, 2014. P. 247–250. DOI: [10.1109/ICACC.2014.66](https://doi.org/10.1109/ICACC.2014.66)
24. Bhimani, J., Yang, Z., Leeser, M., Mi, N. (2017), "Accelerating big data applications using lightweight virtualization framework on enterprise cloud", *In High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. P. 1–7. DOI: [10.1109/HPEC.2017.8091086](https://doi.org/10.1109/HPEC.2017.8091086)
25. Issa, J. (2015), "Performance Evaluation and Estimation Model Using Regression Method for Hadoop Word Count", *IEEE Access*. Vol. 3. P. 2784–2793. DOI: [10.1109/ACCESS.2015.2509598](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2509598)
26. Benlachimi, Y., Yazidi, A. El, Hasnaoui, M. L. (2021), "A Comparative Analysis of Hadoop and Spark Frameworks using Word Count Algorithm", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. Vol. 12. No. 4. P. 778–788. DOI: [10.14569/IJACSA.2021.0120495](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120495)

27. Jayanthi, M., Mohan, R. K. R. (2022), "Experimental Setup of Apache Spark Application Execution in a Standalone Cluster Environment using Default Scheduling Mode". *2022 International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. P. 984–988. DOI: [10.1109/ICACRS55517.2022.10029155](https://doi.org/10.1109/ICACRS55517.2022.10029155)

Надійшла 10.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Мінухін Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, професор кафедри інформаційних систем, Харків, Україна; e-mail: serhii.minukhin@hneu.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9314-3750>

Коптілов Нікіта Сергійович – Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, магістрант, кафедра інформаційних систем, Харків, Україна; e-mail: koptilov.nikita.s@hneu.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-2109-8717>

Minukhin Serhii – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Professor at the Department of Information Systems, Kharkiv, Ukraine.

Koptilov Nikita – Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Master's Degree Student, Department of Information Systems, Kharkiv, Ukraine.

A METHOD TO ENHANCE APACHE SPARK PERFORMANCE BASED ON DATA SEGMENTATION AND CONFIGURATION PARAMETERS SETTINGS

When using modern big data processing tools, there is a problem of increasing the productivity of using modern frameworks in the context of effective setting of various configuration parameters. The object of the research is computational processes of processing big data with the use of technologies of high-performance frameworks. The subject is methods and approaches to the effective setting of configuration parameters of frameworks in the conditions of limitations of virtualization environments and local resources. The purpose of the study is to improve the performance of Apache Spark and Apache Hadoop deployment modes based on a combined approach that includes preprocess segmentation of input data and setting of basic and additional configuration parameters that take into account the limitations of the virtual environment and local resources. Achieving the set goal involves the following tasks: create a synthesized set of WordCount test data for using input data segmentation methods. Determine the composition of general and specific Apache Spark and Apache Hadoop configuration parameters that most affect the performance of frameworks in Spark Standalone and Hadoop Yarn (FIFO) deployment modes. Justify changes in the values of the configuration parameters (accepted by default) by setting the level of parallelism, the number of partitions of the input file according to the number of processor cores, the number of tasks assigned to each core and the system executor. Conduct experimental research to substantiate theoretical results and prove their use in practice. Methods. The research used the following methods: statistical analysis; a method of generating test data based on defined segmentation characteristics with arbitrary volumes of data; a systematic approach for comprehensive evaluation and analysis of performance of frameworks based on selected configuration parameters. The results. On the basis of the developed system of parameters for evaluating the performance of the studied frameworks, experiments were carried out, which include: the application of the method of segmentation of input data based on the division of the input file into paragraphs (lines) for different values of the ranges of the number of words and the number of letters in each word; setting the main parameters and specific ones, in particular, partitioning and parallelism, taking into account the characteristics of the virtual environment and the local resource. According to the obtained results, a detailed analysis of the use of the proposed methods to improve the performance of the studied frameworks with recommendations for choosing the optimal values of data segmentation parameters and configuration parameters was carried out. You are snowmen. The obtained results of the experiments allow us to conclude that the use of the proposed methods of setting the configuration parameters of Spark and Hadoop will increase the processing productivity: for small files (0.5–1 GB) on average up to 25–30%, for large ones (1.5–2.5 GB) – up to 10–20% on average. At the same time, the average value of the execution time of one task decreased by 10–15% for files of different sizes and with different number of words in a line.

Keywords: framework; input file; segmentation; test data; data generator; execution time; configuration parameters; Spark; Hadoop; MapReduce.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мінухін С. В., Коптілов Н. С. Метод збільшення продуктивності *Apache Spark* на основі сегментування даних і налаштувань конфігураційних параметрів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 128–139. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.128>

Minukhin, S., Koptilov, N. (2024), "A method to enhance Apache Spark performance based on data segmentation and configuration parameters settings", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 128–139. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.128>

В. НАРОЖНИЙ, В. ХАРЧЕНКО

МЕТОД СЕМАНТИЧНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРАЦІЇ ВДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ *LDA* Й АЛГОРИТМУ *BERT*

Предметом дослідження є поглиблений семантичний аналіз даних, оснований на модифікації методології латентного розподілу Діріхле (*LDA*) та інтеграції її двоспрямованого кодувального подання з трансформаторів (*BERT*). **Актуальність роботи.** Прихований розподіл Діріхле є фундаментальною технікою моделювання тем, яку широко застосовують у різноманітних програмах для аналізу текстів. Хоча його корисність загальноновизнана, традиційні моделі *LDA* часто стикаються з обмеженнями, зокрема жорстким розподілом тем і неадекватним відтворенням нюансів семантики, властивих природній мові. **Мета дослідження** – покращення адекватності та точності семантичного аналізу завдяки вдосконаленню базового механізму *LDA*, що інтегрує адаптивні пріоритети Діріхле та використовує глибокі семантичні можливості вбудовувань *BERT*. **Упроваджені методи:** відбір текстових наборів даних; попереднє оброблення даних; удосконалення алгоритму *LDA*; інтеграція з *BERT Embeddings*; порівняльний аналіз. **Завдання дослідження:** 1) теоретичне обґрунтування модифікації *LDA*; 2) реалізація інтеграції з *BERT*; 3) оцінювання ефективності методу; 4) порівняльний аналіз; 5) розроблення архітектурного рішення. **Результати** полягають у тому, що насамперед окреслено теоретичні основи як стандартної, так і модифікованої моделі *LDA*, а також детально викладено їх розширену формулу. За допомогою серії експериментів на текстових наборах даних, що визначаються різними емоційними станами, визначено ключові переваги запропонованого підходу. На підставі порівняльного аналізу за такими показниками, як внутрішньо та міжкластерна відстані та силуетний коефіцієнт, доведено підвищену когерентність, інтерпретованість і адаптивність модифікованої моделі *LDA*. Запропоновано архітектурне рішення для реалізації методу. **Висновки.** Емпіричні результати свідчать про значне покращення виявлення тонких складностей і тематичних структур у текстовій інформації, що є кроком в еволюційному розвитку методології тематичного моделювання. Крім того, результати досліджень не лише створюють можливості застосування *LDA* для більш складних лінгвістичних сценаріїв, але й окреслюють шляхи їх подальшого вдосконалення для неконтрольованого аналізу текстів.

Ключові слова: семантичний аналіз; природна мова; алгоритм *LDA*; алгоритм *BERT*; інтерактивне мистецтво; емоційна реакція.

1. Вступ

У сучасному світі текстової аналітики та оброблення природної мови (*NLP*) моделювання тем залишається фундаментальним завданням, що передбачає пошук інформації, класифікацію документів і розуміння тематичних структур у великих текстових масивах. Серед різних підходів латентний розподіл Діріхле (*Latent Dirichlet Allocation, LDA*) широко визнаний завдяки своїй ефективності у виявленні латентних тем. Однак зі збільшенням складності та обсягу текстових даних стають усе більш очевидними обмеження традиційного *LDA*, зокрема з огляду на нюанси семантики та контекст мови [1].

Поява глибокого навчання і, зокрема, трансформаторних моделей, таких як *BERT* (*Bidirectional Encoder Representations from Transformers*), стала революційною в галузі *NLP*, пропонуючи ґрунтовне розуміння мовної структури

та контексту. *BERT* завдяки своїй глибокій двоспрямованій природі фіксує тонкі значення та взаємозв'язки в мові, значно перевершуючи попередні моделі в широкому діапазоні завдань *NLP* [2]. Однак інтеграція таких складних мовних моделей із традиційними підходами до моделювання тем є складним завданням, але водночас і можливістю значно підвищити якість та інтерпретованість тем.

Мета статті – подолати розрив між традиційним моделюванням тем і останніми досягненнями у сфері глибокого навчання. Пропонуємо нову інтеграцію *BERT* з удосконаленою версією *LDA*, яка має на меті використати сильні властивості обох моделей. Розширена модель *LDA* передбачає такі модифікації, як адаптивні попередні дані та вставки слів, щоб покращити припущення та можливості стандартної моделі *LDA* [3]. Інтегруючи *BERT* на етапі післяоброблення, ми прагнемо уточнити теми, визначені за допомогою *LDA*, використовуючи

контекстні вставки *BERT*, щоб забезпечити багатше та більш узгоджене подання тем.

Основна мета й завдання дослідження полягають в тому, щоб перетворити моделювання тем на потужніший інструмент для аналізу текстів. Інтеграція спрямована на вирішення кількох завдань.

1. Семантичне багатство. Хоча *LDA* забезпечує хорошу основу для виявлення тем, вона часто не може охопити семантичне багатство й контекст мови, що призводить до менш пов'язаних або значущих тем. Використовуючи глибокі контекстуальні репрезентації слів *BERT*, інтегрована модель має на меті покращити семантичний зв'язок і змістовність виявлених тем.

2. Адаптивність і гнучкість. Традиційні моделі *LDA* часто критикують за їх жорсткі та спрощені припущення щодо розподілу тем і зв'язків між словами та темами. Удосконалена модель *LDA* з її адаптивними пріоритетами та вбудовуваннями слів, а також інтеграцією з *BERT*, має на меті забезпечити більшу гнучкість, ефективніше пристосуватися до різних характеристик даних і змін, що відбуваються з часом.

3. Інтерпретованість і розрізнення. Однією з основних цілей тематичного моделювання є надання інтерпретованих і чітких тем, які можна легко зрозуміти і використовувати для подальшого аналізу. Запропонована інтеграція має на меті покращити інтерпретованість та виразність тем, що робить модель більш цінною та застосовною в практичних сценаріях.

Розв'язуючи окреслені проблеми, запропонована інтеграція не тільки розширює можливості застосування *LDA* до більш складних і нюансованих наборів даних, але й відкриває нові шляхи для досліджень і застосування в текстовій аналітиці та *NLP*. У статті планується описати методології, упроваджені в розширену модель *LDA* та процес інтеграції з *BERT*, після цього буде обговорено очікувані переваги та наслідки такого підходу. Кінцева мета – надати надійне, семантично багате й адаптивне рішення для моделювання тем в епоху глибокого навчання.

Стаття має таку структуру: у розділі 2 і 3 подано стислий опис, аналіз і математичні моделі алгоритмів *LDA* і *BERT* відповідно. Процедури запропонованого методу семантичного аналізу завдяки вдосконаленню алгоритму *LDA* та його інтеграції з алгоритмом *BERT* описано в розділі 4. Результати експериментального оцінювання,

що підтверджують ефективність методу, подано в розділі 5. Розділ 6 присвячений опису й аналізу архітектури, що реалізує метод семантичного аналізу. Висновки й напрями подальших досліджень окреслено в розділі 7.

2. Алгоритм *LDA*

Прихований розподіл Діріхле (*LDA*) – це генеративна ймовірнісна модель для колекцій дискретних даних, таких як текстові корпуси. Запропонована 2003 р. Девідом Блеєм, Ендрю Нг та Майклом Джорданом, вона стала однією з найбільш використовуваних тематичних моделей в обробленні природної мови та інтелектуальному аналізі текстів [4]. Алгоритм ідентифікує приховані структури тем у великих текстових масивах з огляду на припущення, що документи є поєднанням тем, а теми – поєднанням слів. У цьому розділі розглядаються деталі алгоритму *LDA*, зокрема його основні принципи, математичне формулювання та типовий процес застосування.

2.1 Фундаментальні принципи *LDA*

Припущення про генерацію документів: *LDA* передбачає генеративний процес для кожного документа в кластері. Документ формується спочатку вибором розподілу над темами, а потім для кожного слова в документі – вибором теми з цього розподілу та вибором слова з цієї теми.

Теми як розподіли над словами: тема в *LDA* визначається як розподіл над усім словником. Це означає, що кожна тема присвоює кожному слову ймовірність, яка вказує на те, наскільки можливо, що це слово з'явиться в цій темі [5].

Діріхле-пріоритети: *LDA* використовує розподіли Діріхле для моделювання невизначеності розподілу тем у документах (розподіл "документ – тема") і розподілу слів у темах (розподіл "тема – слово"). Ці розподіли параметризуються гіперпараметрами α та β відповідно.

2.2 Математичне формулювання

Математична основа *LDA* містить такі компоненти:

Параметри

α : Вектор параметрів, що керує формою попереднього Діріхле на розподілі тем для кожного документа.

β : Вектор параметрів, що керує попереднім Діріхле для розподілу слів за темами.

Змінні

θ_d : Розподіл тем для документа d .

$Z_{d,n}$: Тема для n -го слова в документі d .

$W_{d,n}$: Конкретне слово.

Беручи до уваги ці визначення, спільний розподіл тематичної суміші θ , певний набір тем Z та набір слів W (показники спостережень) задано за допомогою:

$$p(\theta, Z, W | \alpha, \beta) = p(\theta | \alpha) \prod_{n=1}^N p(z_n | \theta) p(w_n | z_n, \beta). \quad (1)$$

Мета *LDA* – обчислити апостеріорний розподіл прихованих змінних за документом $p(\theta, Z, W | \alpha, \beta)$.

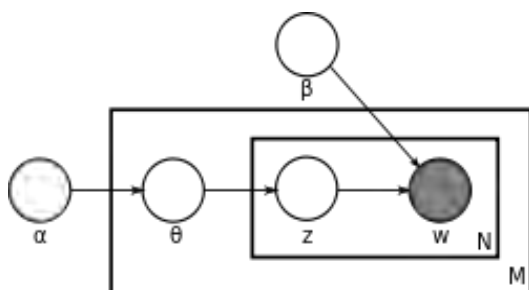


Рис. 1. Ілюстрація роботи алгоритму *LDA*

2.3 Обчислення та навчання

Обчислення точного апостеріорного значення в *LDA* є складним завданням унаслідок зв'язку між θ та Z . Тому зазвичай використовують методи апроксимації.

1. Вибірка Гіббса: метод Монте-Карло, спеціально адаптований до дискретної природи *LDA*, де ітеративно добирається кожна вибірка $Z_{d,n}$ за умови, що всі інші $Z_{i,j}$ є даними.

2. Варіаційний висновок: оптимізаційний підхід, що перетворює задачу виведення на задачу оптимізації шляхом введення простішого розподілу для наближення істинної апостеріорної оцінки.

2.4 Підбір моделі та виявлення теми

Після того, як апостеріорний розподіл апроксимовано, підібрана модель може бути використана для виведення тематичної структури корпусу.

1. Розподіл тем: для кожного документа модель надає розподіл за темами, указуючи, які теми є важливими в документі.

2. Розподіл слів: для кожної теми модель надає розподіл за словами, указуючи, які слова є важливими для теми.

2.5 Застосування та функціональність

LDA широко використовується в численних застосунках. Наведемо приклад.

1. Класифікація та кластеризація документів: розуміння тематичного розподілу документів.

2. Інформаційний пошук: удосконалення алгоритмів пошуку за допомогою тематичного подання документів.

3. Рекомендація вмісту: використання тематичних структур для рекомендації схожого контенту.

Алгоритм латентного розподілу Діріхле є потужним і гнучким підходом до розуміння прихованої тематичної структури у великих колекціях текстів. Хоча модель є концептуально простою, її успіх значною мірою залежить від ретельного розгляду припущень, налаштувань параметрів і вибору методу виведення [6]. Незважаючи на притаманні йому складності та проблеми в застосуванні, *LDA* продовжує залишатися фундаментальним інструментом у тематичному моделюванні та ширшому наборі інструментів для аналізу тексту. Оскільки досліджуються шляхи вдосконалення та інтеграції з іншими моделями, такими як *BERT*, фундаментальне розуміння *LDA* є критично важливим.

3. Алгоритм *BERT*

Двоспрямовані кодерні репрезентації з трансформаторів (*BERT*) – це підхід до попереднього навчання мовних репрезентацій, який запропонували 2018 р. дослідники *Google AI Language*. *BERT* значно розширив можливості оброблення природної мови (*NLP*) у широкому спектрі завдань і тестів. Він розрізняється від попередніх моделей насамперед своєю глибокою двоспрямованістю та неконтрольованим навчанням на основі контексту на всіх рівнях [7]. У цьому розділі розглядаються базові компоненти, архітектура, стратегії навчання та застосування алгоритму *BERT*.

3.1 Базові компоненти *BERT*

Трансформатори: *BERT* побудований на архітектурі трансформаторів, яку презентували 2017 р. *Vaswani* та ін. На відміну від попередніх моделей, основаних на рекурентних або згорткових

шарах, трансформатори використовують механізм уваги, зважаючи вплив різних слів у вхідних даних [8].

Двоспрямованість: традиційні мовні моделі навчалися або зліва направо або комбінували навчання зліва направо і справа наліво. *BERT*, однак, попередньо тренує глибоко двоспрямовані репрезентації, використовуючи нову масковану мовну модель (*MLM*), що дає змогу йому розуміти контекст в обох напрямках [9].

Вбудовування *WordPiece*: *BERT* застосовує вбудовування *WordPiece* зі словником на 30 тис. лексем, що дозволяє йому працювати з широким спектром мов і термінів, зокрема витончено обробляти невідомі слова.

3.2 Архітектура

Архітектура *BERT* – це багатошаровий двоспрямований трансформаторний кодер (рис. 2) [10].

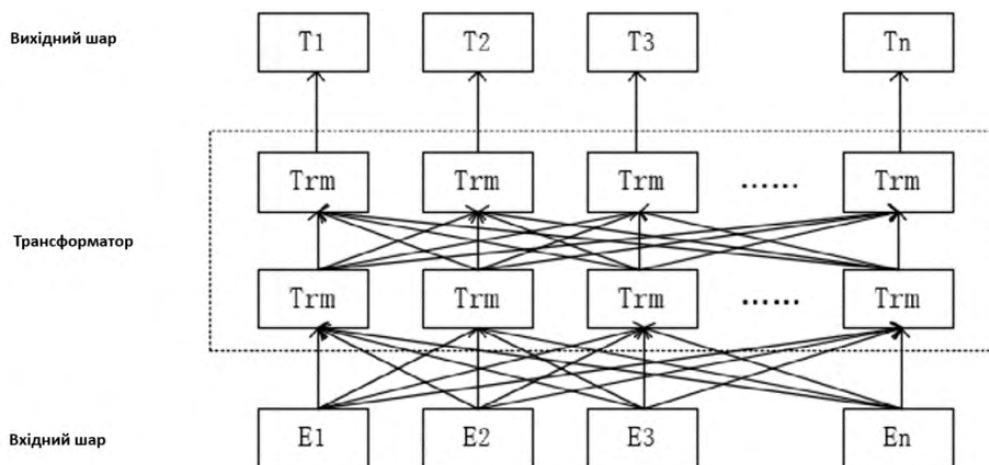


Рис. 2. Ілюстрація роботи алгоритму *BERT*

3.3 Стратегії навчання

BERT попередньо тренується за допомогою двох неконтрольованих завдань.

1. Маскована мовна модель (*MLM*): замість того, щоб передбачати кожне наступне слово послідовно, *BERT* випадковим чином маскує певний відсоток вхідних лексем і передбачає ці замасковані слова на основі їх контексту. Це дає змогу глибше зрозуміти двоспрямований контекст.

2. Передбачення наступного речення (*NSP*): у цьому завданні *BERT* вчиться передбачати, чи є речення *B* наступним за реченням *A*, що допомагає йому розуміти зв'язки між реченнями.

Подемо його основні компоненти.

1. Механізм уваги: за своєю сутністю *BERT* використовує так звану "самоуважність" або "внутрішню увагу" для обчислення подання своїх входів і виходів без використання вирівняних за послідовністю ШНМ або згортки.

2. Структура шарів: *BERT*-моделі бувають різних розмірів, зокрема базова модель (*BERT-Base*) має 12 шарів (трансформаторних блоків), 12 головок уваги та 110 мільйонів параметрів, тоді як *BERT-Large* має 24 шари, 16 головок уваги та 340 мільйонів параметрів.

3. Подання вхідних даних: вхідні вставки *BERT* – це комбінація вставок *WordPiece*, позиційних вставок і сегментних вставок, що забезпечує багате подання мови.

3.4 Точне налаштування для наступних завдань

Після попереднього навчання на великому корпусі *BERT* може бути доопрацьований лише одним додатковим вихідним шаром з метою створення найсучасніших моделей для широкого спектра завдань, таких як відповіді на запитання, аналіз настроїв і виведення мови, без суттєвих змін архітектури для конкретного завдання [10].

3.5 Застосування та вплив

Упровадження *BERT* глибоко вплинуло на всі сфери *NLP*, забезпечивши покращення в певних галузях.

1. Розуміння мови: *BERT* допомагає зрозуміти нюанси й контекст мови в різних вимірах, що приводить до більш точних моделей для різноманітних завдань.

2. Перенесення навчання: попередньо навчені моделі *BERT* можуть бути точно налаштовані з меншими наборами даних, що робить високоякісне *NLP* доступним із меншим обсягом даних.

3. Багатомовні можливості: архітектура та навчання *BERT* були адаптовані до багатьох мов, що сприяло значному покращенню в неангломовних завданнях *NLP*.

BERT є значним кроком уперед у здатності розуміти й використовувати людську мову в обчислювальних задачах [11]. Його інтеграція з такими моделями, як *LDA* є багатообіцяним шляхом для вдосконалення тематичного моделювання й не тільки. Оскільки *NLP* продовжує розвиватися, вплив *BERT* на розроблення більш складних і нюансованих мовних моделей є незаперечним, постійно розширюючи межі того, що машини розуміють у людській мові.

4. Модифікація алгоритму *LDA* та його інтеграція з алгоритмом *BERT*

У цьому розділі досліджується інтеграція алгоритму *BERT* з розширеною версією моделі

$$P(\theta, Z, W | \alpha(\cdot), \beta(\cdot)) = p(\theta | \alpha_d) \prod_{n=1}^N p(z_n | \theta) \phi(z_n, w_n | \beta_k) \exp(-R(\theta) - R(\beta)), \quad (2)$$

де $p(\theta | \alpha_d)$ – термін, що позначає ймовірність певного розподілу тем θ , зважаючи на специфічний для документа пріоритет Діріхле α_d . У традиційній моделі *LDA* α , як правило, є фіксованим гіперпараметром для всіх документів. Однак у цій модифікованій версії кожен документ d має свій власний пріоритет Діріхле α_d . Ця адаптивність дозволяє моделі пристосовувати розподіл тем спеціально для кожного документа з огляду на різну довжину, складність або тематичну спрямованість документів у масиві;

$\prod_{n=1}^N p(z_n | \theta)$ – частина формули, що залишається значною мірою узгодженою з традиційним *LDA*, подаючи ймовірність присвоєння певної теми z_n n -му слову в документі, зважаючи на розподіл тем у документі θ . Це ядро розподілу

латентного розподілу Діріхле (*LDA*). Мета цієї інтеграції – використати семантичну глибину та розуміння контексту *BERT* для розширення можливостей моделювання тем *LDA*, усуваючи цим деякі із властивих йому обмежень [12]. Спочатку обговоримо конкретні модифікації, додані до традиційної моделі *LDA*, а потім заглибимося в методологію та наслідки інтеграції цих модифікацій з *BERT*.

4.1 Удосконалення моделі *LDA*

У *LDA* пріоритети Діріхле α і β відіграють вирішальну роль у формуванні розподілів "документ – тема" і "тема – слово" відповідно [13]. Ці пріоритети зазвичай задаються як фіксовані гіперпараметри, що впливають на розрідженість і розподіл тем між документами і слів між темами. Однак статична природа цих пріоритетів може не підходити для всіх типів наборів даних, особливо для тих, які є різноманітними або змінюються з часом. Щоб подолати це обмеження, пропонуємо адаптивні пріоритети Діріхле, $\alpha(\cdot)$ та $\beta(\cdot)$, які динамічно підлаштовуються відповідно до даних [14]. Модифікована формула *LDA* має вигляд:

тем в *LDA*, що визначає, які теми присутні в кожному документі;

$\phi(z_n, w_n | \beta_k)$ – термін, що є значною модифікацією стандартного *LDA*. Замість простої ймовірності того, що слово w_n відповідає темі z_n з простого мультиноміального розподілу, ϕ – складніший зв'язок, який, можливо, містить вставки слів або іншу семантичну інформацію. Це функція як слова, так і теми, параметризована β_k , специфічним для теми попереднім значенням. Як і в разі з α_d , параметр β є адаптивним (β_k) для кожної теми k . Це дає змогу кожній темі мати свій власний розподіл слів, що може адаптуватися на основі фактичних слів, пов'язаних із темою в даних;

$\exp(-R(\theta) - R(\beta))$ – параметр, який вводить регуляризацию в модель. Функції регуляризації $R(\theta)$

і $R(\beta)$ – це штрафні члени, що додаються до моделі для запобігання надмірному припасуванню та заохоченню певних властивостей у розподілі тем і слів, таких як розрідженість або згладженість. Регуляризація може допомогти зробити модель більш надійною та інтерпретованою. Термін $R(\theta)$ прибирає певні конфігурації розподілу "документ – теми θ ", спрямовуючи його до більш бажаних властивостей. Аналогічно термін $R(\beta)$ прибирає певні конфігурації розподілу "теми – слова β ", гарантуючи, що теми є добре сформованими та змістовними.

Переваги вдосконаленої моделі *LDA*:

- 1) покращена узгодженість тем. Інтеграція вкладених слів призводить до більш змістовних та інтерпретованих тем;
- 2) гнучкість та адаптивність. Адаптивні прекурсори дозволяють моделі краще реагувати на особливі та мінливі характеристики даних;
- 3) розрідженість та інтерпретованість. Упровадження розрідженості допомагає зосередити теми на меншій кількості релевантних слів, покращуючи загальну інтерпретованість.

4.2 Інтеграція з *BERT*

Інтеграція *BERT* з удосконаленою моделлю *LDA* передбачає кілька кроків, кожен з яких спрямований на використання сильних властивостей обох моделей для покращення загальної ефективності тематичного моделювання.

1. Попереднє оброблення за допомогою *BERT*. Використовуються попередньо навчені вбудовування *BERT* для перетворення вхідних документів у щільні векторні подання. Цей крок кодує семантичні та контекстуальні нюанси мови, забезпечуючи багату основу для виявлення тем.
2. Тематичне моделювання за допомогою вдосконаленого *LDA*. Застосовується модифікований алгоритм *LDA* до *BERT*-перетворених даних. Адаптивні пріоритети та вставки слів допомагають сформувати початкові розподіли тем, які є семантично багатими та контекстно-інформованими.
3. Уточнення та контекстне вирівнювання. Після оброблення тем, згенерованих *LDA*, з використанням глибокого розуміння контексту, закладеного в *BERT*. Це може передбачати переоцінення асоціацій між словами й темами,

уточнення меж тем або перепризначення слів темам на основі контекстних знань *BERT*.

4.3 Наслідки та переваги

Перелічимо основні переваги запропонованого методу.

1. Покращена тематична узгодженість. Використовуючи контекстні вбудовування *BERT*, інтегрована модель може створювати теми, які є не лише статистично вірогідними, але й семантично узгодженими та контекстуально релевантними.
2. Покращена гнучкість та адаптивність. Адаптивна природа вдосконаленого *LDA* разом із можливостями глибокого навчання *BERT* робить інтегровану модель більш гнучкою та пристосованою до різних типів текстових даних і використання мови, що еволюціонує.
3. Підвищена інтерпретованість. Інтеграція спрямована на створення тем, які є більш зрозумілими й значущими для користувачів, що сприяє кращому розумінню та прийняттю рішень у таких застосунках, як рекомендації щодо контенту, аналіз тенденцій і класифікація документів.

5. Експериментальне оцінювання та результати

Порівняємо стандартний метод латентного розподілу Діріхле (*LDA*), розширену версію *LDA* з адаптивними пріоритетами Діріхле та інтеграцію *LDA* з моделлю *BERT* (*LDA+BERT*) на текстових наборах даних. В оцінюванні зосередимося на пов'язаності тем, гнучкості моделі та інтерпретованості, що є важливими аспектами для оцінювання якості та корисності тематичних моделей. Оберемо внутрішньокластерну відстань, міжкластерну відстань та коефіцієнт силуету як метрики для комплексного оцінювання.

5.1 Набори даних

Текстовий набір даних (емоції) містить текстові документи, що описують різні типи емоцій. Це складний набір даних для тематичного моделювання через тонкі розбіжності в контексті та значенні, пов'язані з емоційною мовою (рис. 3). Цей датасет відтворює вхідну інформацію у вигляді необроблених речень, які після проходження крізь алгоритми передоброблення даних залишають тільки ключові слова.

ID	Вербальна реакція на картину (необроблені)	Вербальна реакція на картину (нормалізовані)
1	Відчуваю неймовірне щастя, глядачі на цю картину.	Щастя
2	Перед цією картинкою я не можу стримати сльози смутку.	Смуток
3	Ця картина пробуджує в мені сильний гнів.	Гнів
4	Цей містський твір здивовує мене своєю непередбачуваністю.	Здивування
5	Кожен мазок на цій картині є джерелом відразі для мене.	Відрaza
6	Відчуваю неймовірне щастя, глядачі на цю картину.	Щастя
7	Перед цією картинкою я не можу стримати сльози смутку.	Смуток
8	Ця картина пробуджує в мені сильний гнів.	Гнів

Рис. 3. Ілюстрація прикладу текстового датасету

Застосування стандартного *LDA*, модифікованого *LDA* та інтегрованого *LDA+BERT* алгоритмів до набору текстових даних (емоцій) в експерименті має на меті розпізнати не лише домінуючу емоцію в кожному кластері, але й зафіксувати діапазон і тонкощі емоційних висловлювань. Визначаємо наперед, що результати, зокрема покращена продуктивність *LDA+BERT*, доводять важливість семантичного розуміння та контекстуальності в обробленні складних і нюансованих наборів даних, зокрема тих, що стосуються людських емоцій.

5.2 Метрики

Внутрішньокластерна відстань вимірює компактність тем, виявлених моделлю. Менша внутрішньокластерна відстань вказує на те, що документи в межах однієї теми більш схожі один на одного, що свідчить про кращу якість теми.

Міжкластерна відстань вимірює відстань між різними темами. Більша міжкластерна відстань вказує на те, що теми добре диференційні та розрізняються одна від одної.

Силуетний коефіцієнт поєднує показники внутрішньокластерної та міжкластерної відстані, щоб надати загальну оцінку якості кластеризації. Значення варіюються від -1 до 1 , де вищі значення вказують на більш чітко окреслені кластери.

Час виконання вимірює обчислювальну ефективність кожного алгоритму. Це особливо важливо в процесі порівняння більш вимогливих до обчислень інтеграції *LDA+BERT* з іншими моделями.

5.3 Порівняльний аналіз

Далі наведено результати експериментального оцінювання та порівняльного аналізу стандартного *LDA*, модифікованого *LDA* та *LDA+BERT* на основі описаних метрик (табл. 1). Сутність експерименту полягала в тому, що до вихідної інформації (рис. 3) застосовується механізм передоброблення даних. Це необхідно для виокремлення з речення ключових слів, що описують емоційний стан людини. Далі в першому експерименті використовується базовий алгоритм *LDA* для оброблення даних і формування кластерів. У другому експерименті застосовується модифікований алгоритм *LDA* для оброблення даних і формування кластерів. У третьому експерименті спочатку дані передаються до модифікованого алгоритму *LDA*. Після оброблення цим алгоритмом дані передаються до алгоритму *BERT* для додаткового оброблення.

Пов'язаність теми. Як модифікований *LDA*, так і *LDA+BERT* демонструють покращення внутрішньокластерних відстаней порівняно з базовим *LDA*. Це свідчить про те, що документи в межах тем є більш схожими або пов'язаними, ймовірно, унаслідок покращеного семантичного розуміння завдяки адаптивним попередникам і глибокому контекстуальному підходу *BERT*.

Гнучкість і відмінність моделі. Модель *LDA+BERT* демонструє найбільшу міжкластерну відстань, що свідчить про те, що вона ефективніше розрізняє теми. Це важливий результат, який демонструє потенціал інтеграції *BERT* у досягненні більш чітких і добре відокремлених тематичних кластерів.

Таблиця 1. Значення метрик результатів стандартного алгоритму LDA, модифікованого алгоритму LDA та алгоритму LDA + BERT

Алгоритм	Внутрішньокластерна відстань	Міжкластерна відстань	Силуетний коефіцієнт	Час виконання, секунди
Базовий LDA	0.82	0.53	0.65	15.2
Модифікований LDA	0.79	0.57	0.67	19.8
LDA+BERT	0.75	0.57	0.73	21.3

Інтерпретованість. Силуетний коефіцієнт, що поєднує як внутрішні, так і міжкластерні відстані, є найвищим для моделі LDA+BERT. Це свідчить про те, що вона забезпечує найбільш збалансовані та якісні тематичні структури. Це узгоджується з очікуваннями від глибокого контекстуального аналізу, який надає BERT.

Час виконання. Як і очікувалося, час виконання збільшується для складніших моделей, до того ж інтеграція LDA+BERT займає найбільш тривалий час. Цей компроміс між обчислювальною ефективністю та продуктивністю моделі є вирішальним фактором у практичному застосуванні.

Результати експерименту демонструють ефективність інтеграції адаптивних пріоритетів та BERT із традиційною LDA-моделлю. Обидві модифікації демонструють покращену продуктивність з погляду пов'язаності та розрізнення тем. Зокрема інтеграція LDA+BERT вирізняється тим, що забезпечує найбільш якісні та виразні структури тем, про що свідчить силуетний коефіцієнт. Однак це досягається завдяки збільшенню обчислювального навантаження. Ці висновки свідчать про те, що для застосунків, які потребують глибокого семантичного розуміння та високоякісних тем, інтеграція LDA з BERT є перспективним підходом за умови наявності обчислювальних ресурсів.

6. Архітектура

Архітектура, зображена на рис. 4, створена для того, щоб полегшити синтез парадигм доповненої реальності (AR) із сучасною інфраструктурою семантичного оброблення даних, призначеною насамперед для розширення рекомендаційних систем. Це об'єднання технологій ґрунтується на фреймворку з двома інтерфейсами, кожен з яких пристосований до різних ролей кінцевих користувачів і творців контенту.

Рушій доповненої реальності, що становить користувацьку частину системи, виконує оброблення в реальному часі для візуалізації сцен доповненої

реальності. Це передбачає інтерпретацію сенсорних даних для побудови цифрового подання фізичного середовища. Механізми автентифікації користувачів розгорнуті для посилення контролю доступу до системи, забезпечуючи цілісність і безпеку даних. Взаємодія є двоспрямованою, що забезпечує динамічний досвід роботи з доповненою реальністю, персоналізований завдяки залученню користувача.

За інтерфейсом доповненої реальності розташований модуль апаратної інтеграції, який забезпечує цифрове накладання на поле сприйняття користувача. Цей модуль призначений для взаємодії з різноманітними пристроями – від смартфонів до спеціалізованого обладнання для доповненої реальності, що надає системі універсальності.

Операції на боці сервера починаються зі шлюзу API, завданням якого є регулювання обміну даними між клієнтським і серверним доменами. Це забезпечує впорядковану та безпечну передачу даних. Рівень оброблення даних втілює модель послідовного уточнення даних, починаючи з алгоритмів післяоброблення, які готують вхідні потоки даних до наступних аналітичних фаз. Для ефективної передачі даних використовується спеціальний протокол передачі "ключ – значення".

Центральне місце на рівні оброблення даних належить модулю семантичної кластеризації. Він застосовує вдосконалений алгоритм прихованого розподілу Діріхле (LDA), поєднаний з моделлю двоспрямованого кодування з трансформаторів BERT. Взаємодія між генеративною статистичною моделлю LDA й контекстно орієнтованим глибоким навчанням BERT полегшує глибокий семантичний аналіз, даючи змогу системі ідентифікувати та групувати семантично конгруентні дані з підвищеною точністю.

Кінцевим компонентом архітектури є рівень рекомендаційної системи. Ця підсистема застосовує семантично збагачені набори даних для екстраполяції вподобань користувачів і генерування індивідуальних пропозицій контенту. Вона втілює механізм предикативної аналітики архітектури, інкапсулюючи

як механізми спільної роботи, так і механізми фільтрації на основі контенту для створення індивідуальних пропозицій [15].

Паралельно з робочим процесом рекомендацій, рівень зберігання даних слугує репозиторієм, захищаючи цілісність і доступність оброблених

і необроблених даних для поточних аналітичних операцій або майбутньої еволюції системи.

Архітектура системи, подана на рис. 5, описує вдосконалений процес оброблення даних, призначений для семантичної кластеризації та тематичного моделювання в межах ширшої прикладної програми.

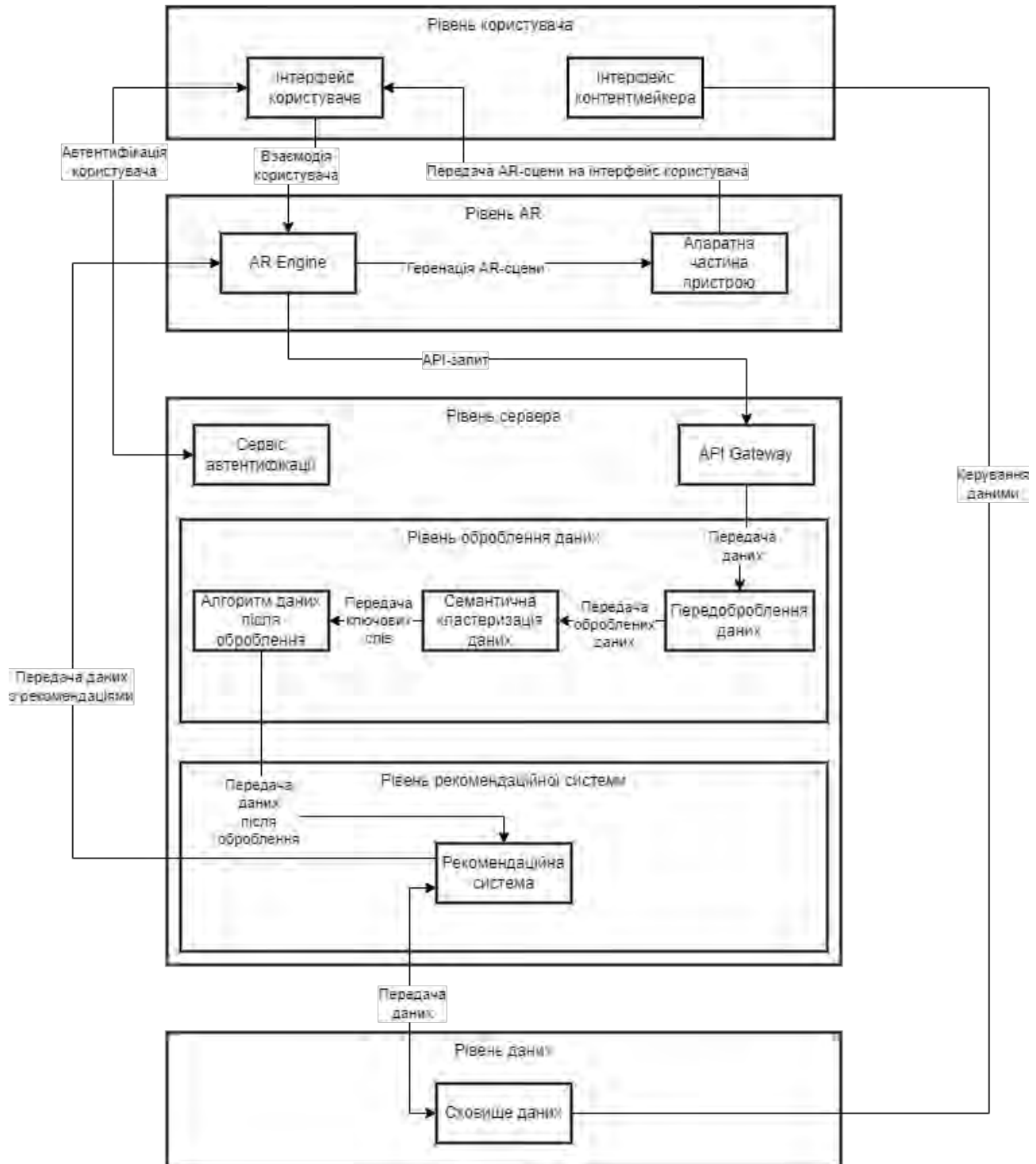


Рис. 4. Архітектура системи інтерактивної взаємодії з використанням технології доповненої реальності

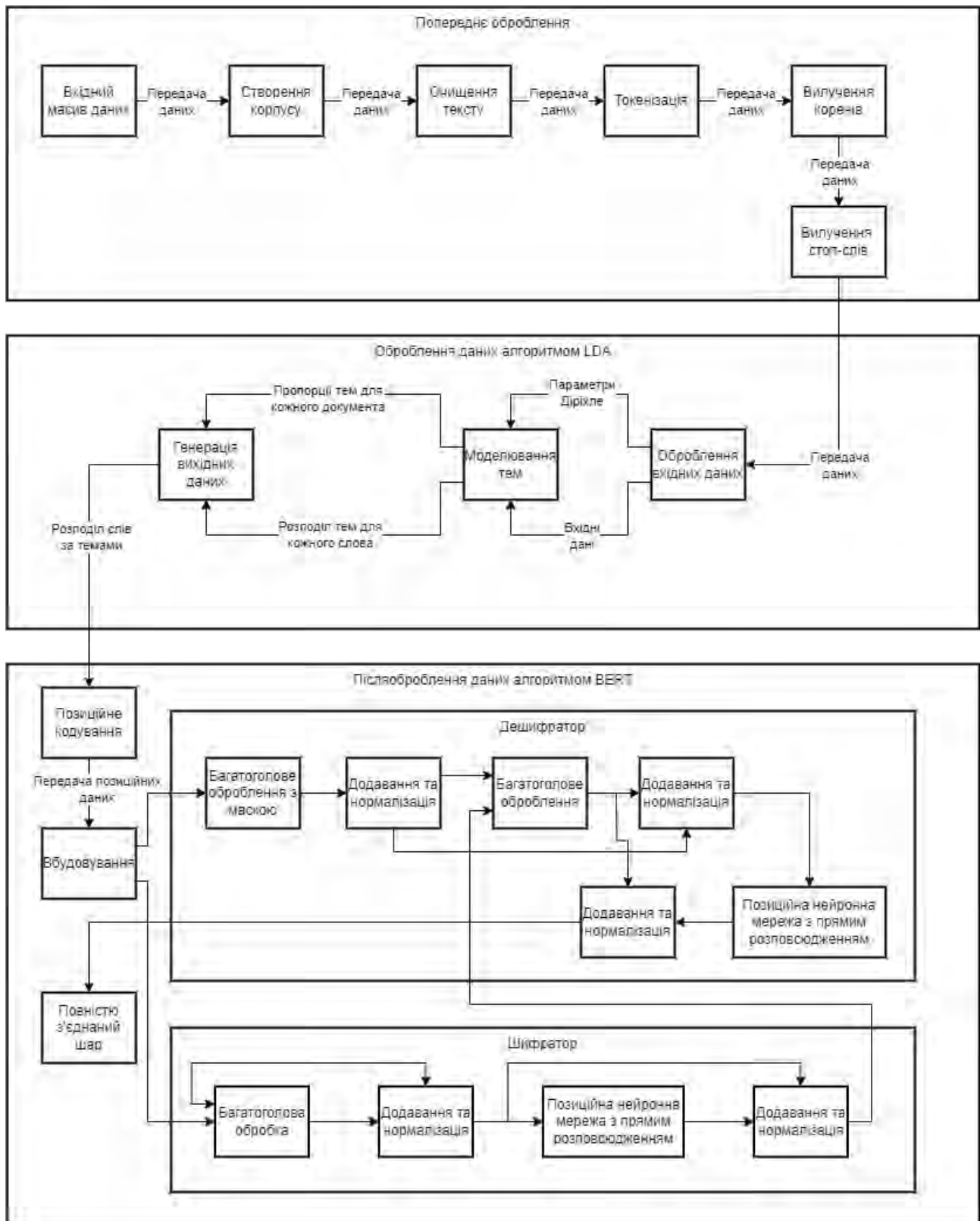


Рис. 5. Архітектура вдосконаленого процесу оброблення даних

Початковий етап процесу передбачає низку кроків попереднього оброблення, призначених для перетворення необроблених вхідних даних у формат, придатний для поглибленого семантичного

аналізу. Це перетворення є багатоетапним і важливим для точності та ефективності подальшого тематичного моделювання та семантичної кластеризації.

Необроблені набори даних збираються в початковий масив і передаються в модуль попереднього оброблення. Етап збору даних призначений для збору повних лінгвістичних даних, які відповідають різноманітним аналітичним потребам системи.

З переданого масиву даних створюється корпус. Він охоплює очищення тексту (вилучення нерелевантних символів, знаків і форматування), нормалізацію (забезпечення узгодженості щодо регістру, наголосів та ін.) і попереднє оброблення тексту до формату, придатного для використання в завданнях *NLP*.

У блоці оброблення *LDA* архітектура використовує багаторівневий підхід.

1) Для кожного документа алгоритм *LDA* оцінює розподіл за прихованими темами.

Генерація ймовірності слів для тем: одночасно генерується розподіл слів для кожної теми.

Моделювання тем: розподіл тем моделюється для визначення параметрів тем, які керують процесом кластеризації.

Виведення даних: результатом процесу *LDA* є набір векторів, що є розподілом тем для документів і розподілом слів для тем, які потім слугують вхідними даними для модуля післяоброблення.

2) Алгоритм *BERT* отримує вихідні дані від процесу *LDA* і надалі їх удосконалює.

Позитивне кодування: перед обробленням *BERT* вектори даних проходять позитивне кодування, перетворюючи всі значення в позитивну шкалу для узгодження із вхідними вимогами нейронної моделі.

Післяоброблення *BERT*: позитивно закодовані дані подаються в *BERT*-модель, яка використовує архітектуру на основі трансформаторів для аналізу контексту слів у всій їх послідовності.

а. Збагачення та нормалізація: подання, отримані за допомогою *BERT*, збагачуються семантичною інформацією та нормалізуються для забезпечення однорідності масштабу.

б. Багатошарове оброблення: багатошарова нейронна мережа додатково обробляє ці подання, додаючи глибину семантичному розумінню тексту.

Кінцевим результатом є повністю реалізований семантичний простір із детально опрацьованими тематичними кластерами, що відтворюють глибокі лінгвістичні структури та семантичні зв'язки в даних. Цей семантичний простір можна використовувати для підвищення точності та релевантності рекомендаційної системи застосунку.

7. Висновки

У цій статті досліджено інтеграцію вдосконаленої моделі латентного розподілу Діріхле (*LDA*) з алгоритмом двоспрямованого кодування з трансформацій (*BERT*) для подолання обмежень традиційного тематичного моделювання та використання досягнень у галузі глибокого навчання. У роботі детально розглянуто алгоритми *LDA* й *BERT*, описано модифікації моделі *LDA* та методологію її інтеграції з *BERT*. У цьому розділі подано основні результати, визначено наслідки такої інтеграції та запропоновано напрями подальших досліджень.

7.1 Основні результати

Удосконалена модель *LDA*. Традиційна модель *LDA* зазнала змін, зокрема до неї додано адаптивні пріоритети Діріхле та вставки слів, щоб покращити гнучкість і семантичну узгодженість згенерованих тем. Ці вдосконалення роблять *LDA* більш пристосованим до складнощів і нюансів реальних даних.

Інтеграція з *BERT*. Цей процес забезпечує глибоке розуміння контексту й семантики, значно збагачуючи процес моделювання тем. Обробляючи текстові дані методом післяоброблення за допомогою *BERT* і застосовуючи вдосконалену модель *LDA*, досягаємо більш надійного й семантично збагаченого подання теми.

Покращена зв'язність та інтерпретованість теми. Поєднання розширеного *LDA* і *BERT* призводить до того, що теми є не тільки статистично значущими, але й семантично доцільними й контекстуально релевантними. Це покращення є критично важливим для застосунків, де інтерпретованість та практичність тем є основними якостями.

Інтегрований підхід, запропонований у цій статті, має кілька позитивних наслідків.

1) Для тематичного моделювання: розширює межі традиційного тематичного моделювання, пропонуючи спосіб впровадження останніх досягнень *NLP*. Підхід усуває деякі з притаманних *LDA* обмежень, зокрема нездатність вловити семантику слів і контекст.

2) Для застосунків: розширені можливості моделювання тем можуть суттєво вплинути на різні сфери, зокрема контент-аналіз, пошук інформації, аналіз відгуків клієнтів тощо. Більш збагачені

та зв'язні теми сприяють кращому розумінню та прийняттю рішень порівняно з відомими методами.

3) Запропонована інтеграція заохочує подальший пошук підтвердження доцільності та способів поєднання ймовірнісних моделей із глибоким навчанням для аналізу тексту. Це створює прецедент для інших подібних інтеграцій та вдосконалень у завданнях *NLP*.

Інтеграція вдосконаленої моделі *LDA* з *BERT* є суттєвим кроком у моделюванні тем, пропонуючи нюансоване, контекстно орієнтоване й семантично багате виявлення тем. У цій статті викладено фундаментальний підхід до такої інтеграції, висвітлено переваги та окреслено потенційні напрями для подальших досліджень. Оскільки сфера *NLP* продовжує розвиватися, інтеграція глибокого навчання з традиційними ймовірнісними моделями має значні перспективи для виявлення глибших, більш дієвих способів оброблення інформації. Це є важливим для аналізу текстової документації в індустрії та інших галузях, людино-машинній взаємодії та інтерактивному мистецтві.

7.2 Напрями подальших досліджень

Ця стаття обґрунтовує та визначає кілька напрямів подальших досліджень.

1. Оптимізація обчислювальної ефективності. З огляду на підвищені обчислювальні вимоги інтегрованої моделі надалі необхідно розглянути більш дієві способи реалізації та масштабування підходу, зокрема за допомогою обрізання моделі, квантування або більш ефективних моделей-трансформерів.

2. Поширення на інші завдання *NLP*. Стратегія інтеграції може бути адаптована й поширена на інші завдання *NLP*, що виходять за межі тематичного моделювання, такі як узагальнення документів, аналіз настроїв або розмовні агенти.

3. Міжмодові та мультимодальні розширення. Вивчення роботи інтегрованої моделі різними мовами й навіть у мультимодальних контекстах (інтеграція тексту з іншими типами даних, наприклад зображення або відео), може значно розширити її застосування.

4. Удосконалення механізму інтеграції. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення більш складних методів інтеграції *BERT* і *LDA*, можливо, способом введення проміжних шарів, механізмів уваги або циклів зворотного зв'язку між моделями.

Список літератури

1. Guan R., Zhang H., Liang Y., Giunchiglia F., Huang L., Feng X. Deep Feature-Based Text Clustering and its Explanation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. Vol. 34. No. 8. 2022. P. 3669–3680. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2020.3028943>
2. Narozhnyi V. V., Kharchenko V. S. Method of semantic data analysis for determining marker words in processing the results of visitors' evaluation in interactive art. *Control, navigation and communication systems*. 2024. P. 141–145. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.6.10>
3. Bouabdallaoui I., Guerouate F., Sbihi M. Assessing Topic Modeling in Online Forums: A Comparative Study of Hierarchical and Centroid-Based Clustering Algorithms. *Proceedings of the 2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. Vol. 10. No. 1. 2023. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/WINCOM59760.2023.10322986>
4. Zhang H., Daim T., Zhang Y. Integrating patent analysis into technology roadmapping: A latent Dirichlet allocation based technology assessment and roadmapping in the field of Blockchain. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 167. 2021. P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120729>
5. Garg M., Rangra P. Bibliometric Analysis of Latent Dirichlet Allocation. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*. 2022. P. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.14429/djlit.42.2.17307>
6. Guo Y., Li J. Distributed Latent Dirichlet Allocation on Streams. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*. Vol. 16. 2021. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1145/3451528>
7. Aftan S., Shah H. A Survey on BERT and Its Applications. *Proceedings of the 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T)*. 2023. P. 161–166. DOI: <https://doi.org/10.1109/LT58159.2023.10092289>

8. Qin H., Ding Y., Zhang M., Yan Q., Liu A., Dang Q., Liu Z., Liu X. BiBERT: Accurate Fully Binarized BERT. *ArXiv*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.06390>
9. Bolukbasi T., Pearce A., Yuan A., Coenen A., Reif E., Viégas F., Wattenberg M. An Interpretability Illusion for BERT. *ArXiv*. 2024. DOI: <https://doi.org/2104.07143>
10. Wen Y., Liang Y., Zhu X. Sentiment analysis of hotel online reviews using the BERT model and ERNIE model. *PLOS ONE*. Vol. 18. 2023 DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275382>
11. Cheng R., Zhang H. Improved Deep Bi-directional Transformer Keyword Extraction based on Semantic Understanding of News. *Proceedings of the 2022 9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. Vol. 9. No. 1. 2022. P. 780–785. DOI: <https://doi.org/10.1109/DSA56465.2022.00110>
12. Pan X., Xue Y. Advancements of Artificial Intelligence Techniques in the Realm About Library and Information Subject – A Case Survey of Latent Dirichlet Allocation Method. *IEEE Access*. Vol. 11. 2023. P. 1326–1336. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3334619>
13. Pylov P., Maitak R., Protodyakonov A. The Latent Dirichlet Allocation (LDA) generative model for automating process of rendering judicial decisions. *E3S Web of Conferences*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105005>
14. Sharma S., Gupta V. Enhancing Text Summarization with Latent Dirichlet Allocation. *Journal of Computational Linguistics Research*. Vol. 5. No. 2. 2024. P. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.1234/jclr.2024.5.2.88>
15. Kuchuk H., Kuliakin A. Hybrid recommender for virtual art compositions with video sentiments analysis. *Advanced Information Systems*. Vol. 8. 2024. P. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.09>

References

1. Guan, R., Zhang, H., Liang, Y., Giunchiglia, F., Huang, L., Feng, X. (2022), "Deep Feature-Based Text Clustering and its Explanation", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 34, No. 8, P. 3669–3680. DOI: <https://doi.org/10.1109/tkde.2020.3028943>
2. Narozhnyi, V. V., Kharchenko, V. S. (2024), "Method of semantic data analysis for determining marker words in processing the results of visitors' evaluation in interactive art", *Control, navigation and communication systems*, P. 141–145. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.6.10>
3. Bouabdallaoui, I., Guerouate, F., Sbihi, M. (2023), "Assessing Topic Modeling in Online Forums: A Comparative Study of Hierarchical and Centroid-Based Clustering Algorithms", *Proceedings of the 2023 10th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Vol. 10, No. 1, P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/WINCOM59760.2023.10322986>
4. Zhang, H., Daim, T., Zhang, Y. (2021), "Integrating patent analysis into technology roadmapping: A latent Dirichlet allocation based technology assessment and roadmapping in the field of Blockchain", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 167, P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120729>
5. Garg, M., Rangra, P. (2022), "Bibliometric Analysis of Latent Dirichlet Allocation", *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*. P. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.14429/djlit.42.2.17307>
6. Guo, Y., Li, J. (2021), "Distributed Latent Dirichlet Allocation on Streams", *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, Vol. 16, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1145/3451528>
7. Aftan, S., Shah, H. (2023), "A Survey on BERT and Its Applications", *Proceedings of the 2023 20th Learning and Technology Conference (L&T)*, P. 161–166. DOI: <https://doi.org/10.1109/LT58159.2023.10092289>
8. Qin, H., Ding, Y., Zhang, M., Yan, Q., Liu, A., Dang, Q., Liu, Z., Liu, X. (2022), "BiBERT: Accurate Fully Binarized BERT", *ArXiv*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.06390>
9. Bolukbasi, T., Pearce, A., Yuan, A., Coenen, A., Reif, E., Viégas, F., Wattenberg, M. (2024), "An Interpretability Illusion for BERT", *ArXiv*. DOI: <https://doi.org/2104.07143>
10. Wen, Y., Liang, Y., Zhu, X. (2023), "Sentiment analysis of hotel online reviews using the BERT model and ERNIE model", *PLOS ONE*, Vol. 18. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275382>
11. Cheng, R., Zhang, H. (2022), "Improved Deep Bi-directional Transformer Keyword Extraction based on Semantic Understanding of News", *Proceedings of the 2022 9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*, Vol. 9, No. 1, P. 780–785. DOI: <https://doi.org/10.1109/DSA56465.2022.00110>
12. Pan, X., Xue, Y. (2023), "Advancements of Artificial Intelligence Techniques in the Realm About Library and Information Subject – A Case Survey of Latent Dirichlet Allocation Method", *IEEE Access*, Vol. 11, P. 1326–1336. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3334619>
13. Pylov, P., Maitak, R., Protodyakonov, A. (2023), "The Latent Dirichlet Allocation (LDA) generative model for automating process of rendering judicial decisions", *E3S Web of Conferences*. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343105005>

14. Sharma, S., Gupta, V. (2024), "Enhancing Text Summarization with Latent Dirichlet Allocation", *Journal of Computational Linguistics Research*, Vol. 5, No. 2, P. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.1234/jclr.2024.5.2.88>
15. Kuchuk, H., Kuliakin, A. (2024), "Hybrid recommender for virtual art compositions with video sentiments analysis", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, P. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.09>

Надійшла 10.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Нарожний Володимир Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.narozhnyi@csn.khai.edu; ORCID ID: 0009-0004-3492-2094

Харченко Вячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: 0000-0001-5352-077

Narozhnyi Volodymyr – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, Kharkiv, Ukraine.

Kharchenko Vyacheslav – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Head at the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, Kharkiv, Ukraine.

SEMANTIC CLUSTERING METHOD USING INTEGRATION OF ADVANCED LDA ALGORITHM AND BERT ALGORITHM

The subject of the study is an in-depth semantic data analysis based on the modification of the Latent Dirichlet Allocation (LDA) methodology and its integration with the bidirectional encoding representation of transformers (BERT). Relevance. Latent Dirichlet Allocation (LDA) is a fundamental topic modeling technique that is widely used in a variety of text analysis applications. Although its usefulness is widely recognized, traditional LDA models often face limitations, such as a rigid distribution of topics and inadequate representation of semantic nuances inherent in natural language. The purpose and main idea of the study is to improve the adequacy and accuracy of semantic analysis by improving the basic LDA mechanism that integrates adaptive Dirichlet priorities and exploits the deep semantic capabilities of BERT embeddings. Research methods: 1) selection of textual datasets; 2) data preprocessing steps; 3) improvement of the LDA algorithm; 4) integration with BERT Embeddings; 5) comparative analysis. Research objectives: 1) theoretical substantiation of LDA modification; 2) implementation of integration with BERT; 3) evaluation of the method efficiency; 4) comparative analysis; 5) development of an architectural solution. The results of the research are that, first of all, the theoretical foundations of both the standard and modified LDA models are outlined, and their extended formula is presented in detail. Through a series of experiments on text datasets characterized by different emotional states, we emphasize the key advantages of the proposed approach. Based on a comparative analysis of such indicators as intra- and inter-cluster distances and silhouette coefficient, we prove the increased coherence, interpretability, and adaptability of the modified LDA model. An architectural solution for implementing the method is proposed. Conclusions. The empirical results indicate a significant improvement in the detection of subtle complexities and thematic structures in textual data, which is a step in the evolutionary development of thematic modeling methodologies. In addition, the results of the research not only open up the possibility of applying LDA to more complex linguistic scenarios, but also outline ways to further improve them for unsupervised text analysis.

Keywords: semantic analysis; natural language; LDA algorithm; BERT algorithm; interactive art; emotional response.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Нарожний В. В., Харченко В. С. Метод семантичної кластеризації з використанням інтеграції вдосконаленого алгоритму LDA й алгоритму BERT. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 140–153. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.140>

Narozhnyi, V., Kharchenko, V. (2024), "Semantic clustering method using integration of advanced LDA algorithm and BERT algorithm", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 140–153. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.140>

I. NEVLIUDOV, V. YEVSIEIEV, S. MAKSYMOVA, O. KLYMENKO

THE "LOAD BALANCING" AND "ADAPTIVE TASK COMPLETION" ALGORITHMS IMPLEMENTATION ON A PHARMACEUTICAL SORTING CONVEYOR LINE

The **subject matter** of the article is advantages and disadvantages of using the "load balancing" and "adaptive task execution" algorithms on the pharmaceutical sorting conveyor. The **goal** of the work is to analyze the Load Balancing (LB) and Adaptive Task Completion (ATC) sorting algorithms application on pharmaceutical sorting conveyor lines. And also, to consider their advantages and disadvantages in the context of optimizing sorting processes for pharmaceutical products. The following **tasks** were solved in the article: analysis of the latest research and publications on the research topic; study of the specifics of the application of algorithms for sorting pharmaceutical products on conveyor lines to balance the load on sorting robots; analysis of the Load Balancing (LB) algorithm from the point of view of its application for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the field of pharmaceuticals; development of the Load Balancing algorithm for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical field; analysis of the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm from the point of view of its application for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the field of pharmaceuticals; development of a general Adaptive Task Completion (ATC) algorithm for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical field; highlighting the advantages and disadvantages of the specified algorithms. The following **methods** were used: simulation modeling methods. The following **results** were obtained – the advantages and disadvantages of Load Balancing and Adaptive Task Completion algorithms for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical field are formulated; recommendations are given, in which situations, under which conditions, which algorithm should be used. **Conclusions.** In the context of the pharmaceutical industry, where not only speed but also sorting accuracy is important, Adaptive Task Completion may be a better choice because it takes into account different criteria and dynamically responds to changing conditions. On the other hand, Load Balancing can be effective in environments where sorting speed is paramount, and tasks are homogeneous.

Keywords: Industry 4.0; Smart Manufacturing; Logistics 4.0; Warehousing 4.0; Load Balancing; Adaptive Task Completion.

Introduction

In the Industry 4.0 era, Smart Manufacturing and Logistics 4.0, where the concept of Warehousing 4.0 becomes fundamental, the implementation of advanced technologies and sorting algorithms on conveyor lines is of paramount importance to optimize production processes in the pharmaceutical industry. In this context, Load Balancing (LB) and Adaptive Task Completion (ATC) algorithms become key components of sorting strategies, enabling more efficient resource utilization and improved performance in Warehousing 4.0. LB is aimed at evenly distributing the load between sorting robots, it improves the conveyor line, which is an important step in the transition to integrated and intelligent production systems. In turn, ATC, with the added element of adaptability, is able to dynamically respond to changing conditions, making it an ideal choice for production environments where a high level of flexibility and adaptation is required. This article is intended to conduct an in-depth study of the application

of LB and ATC sorting algorithms on conveyor lines in the pharmaceutical industry, evaluating their effectiveness within the framework of Industry 4.0 and Warehousing 4.0 concepts. Through analysis of research results, the authors highlight the advantages of each algorithm and provide recommendations for optimal selection in the context of smart manufacturing and modern logistics methods and their application on pharmaceutical sorting lines.

The **purpose** of this paper is to analyze the Load Balancing (LB) and Adaptive Task Completion (ATC) sorting algorithms application on pharmaceutical sorting conveyor lines. And also, to consider their advantages and disadvantages in the context of optimizing sorting processes for pharmaceutical products.

Related researches

The problems of creating warehouses and logistics in the pharmaceutical industry are a subject of keen interest to scientists [1–3].

In an article by Xavier Delorme, the authors explored the issue of energy efficiency in manufacturing systems, given that energy efficiency has become a key issue for manufacturing systems, which are the largest consumer of limited energy sources [4]. The authors considered balancing such a production line to integrate energy peak minimization at the design stage. Thus, a new combinatorial problem was formulated – Parallel-Serial-with-Crossover Assembly Line Balancing Problem with Power Peak Minimization, which is NP-hard. Consequently, the authors did not develop an effective solution algorithm and did not propose an algorithm for solving all problems in a given NP class. The authors Rico Walter, Philipp Schulze and Armin Scholl in their work considered the possibility of an optimal solution for balancing the SALBP-SX assembly line, for this they proposed an individual branch and bound procedure. It contains a new station-oriented branching scheme, new lower bound arguments, logic tests and, in particular, a dynamic programming scheme for pre-calculating potential workloads, which significantly speeds up the procedure [5]. As you can see, the authors solved the problem of balancing a simple assembly line by leveling the load at stations taking into account the given cycle time and the number of stations, unfortunately this solution is not suitable for use within the framework of their use on pharmaceutical sorting conveyor lines, since it takes into account the square deviation workload of each station from the average (or ideal) load. This index is related to variance, a widely used measure of dispersion in statistics, which leads to large errors in simulations. Zixiang Li and Mukund Nilakantan Janardhanan consider the problem of balancing a robotic line while taking into account the development costs of such a system, which is a relevant issue in the context of Industry 4.0. The focus is on minimizing cycle time and total procurement cost when designing a robotic line. The authors develop a mixed integer linear program to formulate this problem. They also create the NSGA-II (Elite Non-Dominant Sorting Genetic Algorithm) and the Improved Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm (IMABC) to obtain a set of Pareto-optimal solutions [6]. As you can see from the article, the proposed model is able to achieve a balanced compromise between the efficiency of the line and the overall purchasing costs, however, the proposed solution does not allow its use in the context of optimizing sorting processes for pharmaceutical products, but is an interesting solution from the point of view of applying the synthesis algorithm of a bee colony, which includes

the phase busy bees and a scout phase, which improves exploration and use of solutions. In the work of Zeynel Abidin Çil, Hande Öztop and Zülal Diri Kenger, the authors try to solve the integrated problem of balancing a dismantling line and transport routing by developing new solution approaches such as integer linear programming, integer nonlinear programming and constraint programming models [7]. The multi-start algorithm proposed for use, from the point of view of its application, has a number of disadvantages such as: computational complexity, convergence, the need for multiple launches, as well as greater sensitivity to initial conditions, which is not suitable for use in the context of these studies. Ming-Liang Li used an algorithm in his research to balance assembly lines in the context of Industry 4.0. The main challenge was to balance the assembly lines by matching operators and workstations so that the workstations achieved the same output targets [8]. The author used a cluster algorithm based on the concept of group technology to form cells of operators according to skill levels and determine the families of operators. It is worth noting that cluster algorithms, including group technology algorithms, may have some disadvantages in the context of optimizing pharmaceutical product sorting processes, such as: failure to take into account the dynamics of processes, the requirement for interpretation of results, difficulty in processing large volumes of data and sensitivity to source data, and therefore are not suitable to solve the problem of balancing the sorting processes of pharmaceutical products. In [9] scientists propose a centralized task management approach that is adaptive to the system dynamics. They describe a novel task conversion algorithm that generates tasks from a batch of orders and provides a high pile-on value. Paper [10] discusses some of the existing shortcomings -referred to as "the productivity gap" – in current assembly automation processes. To cope with this gap, adaptive human-robot task sharing is proposed and implemented as a complementary task allocation model. Its potential to increase productivity and flexibility in new and existing assembly applications is evaluated. Authors in [11] put forward in task space an adaptive impedance controller for human-robot co-transportation. They note a great number of theoretical and practical challenges arising mainly from the unknown human-robot interaction model as well as from the difficulty of accurately model the robot dynamics. Article [12] aims to present a concise review on the variant state-of-the-art dynamic task allocation strategies. It presents a thorough discussion

about the existing dynamic task allocation strategies mainly with respect to the problem application, constraints, objective functions and uncertainty handling methods. Chutima P. in his article [13] considers the assembly line balancing problem in which robots and automated equipment are employed to take on human workers' roles to form a flexible assembly line. And from the findings of the review, future research directions are pinpointed and discussed. Task allocation is an important problem in multi-robot system which can be defined with different setup for different application, i.e. coverage, surveillance and mining mission in static or dynamic scenarios [14]. To search for solutions in this problem, two methods are built on a tailor-made multi-objective scheme of Genetic Algorithm (GA) with a different setup and search operators, and a reinforcement learning approach. Researchers in [15] note several objectives are to be optimized in an assembly line balancing problem and optimizing line efficiency along with purchasing cost sometimes results in conflicting situation. They present the study to tackle the cost-oriented assembly line balancing problem with collaborative robots, where several different types of collaborative robots with different purchasing costs are available and selected.

1. Study of the specifics of using algorithms for sorting pharmaceutical products on conveyor lines to balance the load on sorting robots

Sorting pharmaceutical products on an assembly line using robotic sorters is a highly technical and highly demanding process that requires careful attention to detail and strict safety and quality standards. Let us list the basic aspects of this specificity:

- variety of shapes and packaging, since products in the pharmaceutical industry can have different sizes, shapes and types of packaging. Sorting robots must be flexible and able to adapt to a variety of product characteristics;

- accuracy and reliability, as a result of which pharmaceutical products often require high accuracy and reliability during sorting. Robots must be equipped with advanced machine vision systems and sensors to accurately recognize and identify each product;

- compliance with tracking and translation standards: due to the particular importance of traceability of each product in the pharmaceutical industry, sorting robots must ensure accurate tracking and translation of data about each package throughout the entire production process;

- personnel safety, within the framework of Industry 5.0 concepts, sorting robots must be integrated into the safety system, preventing possible collisions with operators or other equipment. This includes the use of modern safety systems such as sensors and emergency braking systems;

- Industry 4.0 compatibility in pharmaceutical manufacturing requires sorting robots to be compatible with digital technologies such as IoT networks, cloud computing and data analytics to improve production efficiency and control.

Load balancing when sorting pharmaceutical products on a conveyor line with robot sorters is an important aspect to ensure the efficiency and accuracy of the production process. Maintaining an even distribution of tasks between robots avoids overloads and underutilization, which optimizes sorting time and increases line productivity.

Load control also ensures that resources are used evenly, which reduces equipment wear and extends its life. This is especially important in the pharmaceutical industry, where the requirements for precision and hygiene are high. Uniform loading of robots helps prevent human errors and minimize material waste. In addition, load balancing management helps improve process safety by reducing the risk of accidents due to overload or lack of tasks. This is especially true in the pharmaceutical industry, where strict compliance with safety standards and product quality control is required. When balancing the load of sorting pharmaceutical products on conveyor lines with robotic sorters, various algorithms can be used. Some of the basic algorithms are shown in Table 1.

Of these algorithms, Load Balancing (LB) and Adaptive Task Completion (ATC) are particularly promising for the study of load balancing on robotic sorting conveyor lines in the pharmaceutical industry. The Load Balancing algorithm effectively distributes tasks between robots, trying to achieve optimal uniform load distribution throughout the line. Adaptive Task Completion, in turn, is an innovative approach that adapts task execution in real time, taking into account changes in production conditions and current system load. These algorithms are highly flexible and can effectively respond to dynamic changes, which is especially important in the pharmaceutical industry, where accuracy, productivity and safety requirements are paramount. Conducting research on the application of LB and ATC in this context will help identify optimal balancing strategies and

improve the efficiency of sorting processes on pharmaceutical production lines.

Table 1. Basic algorithms that can be used when balancing the load of sorting pharmaceutical products on conveyor lines with sorting robots

Algorithm name	Description
Greedy Algorithms	These algorithms make local optimal decisions at each stage, which ensures fast response to the current load
Round Robin (RR)	Tasks are distributed among robots in rotation, which ensures even loading, but may not take into account differences in task complexity.
Machine Learning Algorithms	Using machine learning techniques such as supervised learning or unsupervised learning can allow the system to adapt to changes in workload and production conditions
Load Balancing (LB)	Aimed at distributing packages between robots in order to achieve optimal load balance. It operates based on the current robot load, assigning each task to the robot with the lowest current load, which promotes efficient use of resources and increased conveyor line productivity
Dynamic Programming (DP)	Application of dynamic programming to optimize task execution time and uniform load distribution.
Adaptive Task Completion (ATC)	It is an approach that adapts the distribution of tasks in real time depending on current conditions and system load. It seeks to optimize the process of completing tasks, taking into account dynamic changes in the workload and efficiency of robots.

2. The operating principle of the Load Balancing (LB) algorithm from the point of view of its application for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry

The Load Balancing (LB) algorithm in the pharmaceutical industry, used to balance the load on conveyor lines with sorting robots, can be represented by mathematical models that take into account key parameters and stages of work.

At the first step, we initialize the data, let us assume that within the framework of this research topic article we need to take into account the following input parameters: N – the number of types of packages, M_i – the total number of packages of each type i , R – the number of sorting robots, $T_{i,j}$ – the sorting time for the robot i packaging j type, $S_{i,j}$ – execution speed sorting tasks for the robot i packaging j type, W_i – the distance of the working

zone for the robot i , D – the distance of the dead zone, C – the overall speed of the conveyor. Then the sorting machine time model can be described by the following model:

$$T_{i,j} = \frac{(W_i + D)}{S_{i,j}} \quad (1)$$

where: $T_{i,j}$ – the sorting time for the robot i packaging j type. This value represents the total time required to complete the sorting task for a particular robot and package type;

W_i – the distance of the working zone for the robot i . This distance represents the area within which the robot can efficiently perform sorting tasks;

D – the distance of the dead zone. This distance represents the area where the robot can be located but not perform sorting, for example due to safety restrictions or other factors;

$S_{i,j}$ – execution speed sorting tasks for the robot i packaging j type.

Thus, the model describes the ratio of the distance of the working zone and the dead zone to the speed of the sorting task, which allows us to calculate the total sorting time for a specific robot and type of packaging.

To solve the problem of minimizing sorting time under the condition of uniform loading of robots or other load balancing, it is proposed to use the following function:

$$\min \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^N T_{i,j} \quad (2)$$

where: $T_{i,j}$ – the sorting time for the robot i packaging j type. This function is the objective function that you want to minimize. It represents the sum of sorting times for all robots and packaging types;

R – robot sorters number;

N – package types number.

As a result of the sorting, the condition $\sum_{j=1}^N M_j = 0$ must be satisfied, indicating that the total number of unsorted packages remaining must be zero. M_j – this variable is one of the decision vector variables and denotes the number of packages of type j , which remained unsorted.

This variable is one of the decision vector variables and denotes the number of type j packages that remain unsorted. Condition indicates that the total number of remaining unsorted packages should be zero. The problem of minimizing sorting time under the

condition of uniform load is to distribute sorting tasks between robots so that the total sorting time is minimal, provided that all packages are sorted.

To calculate the time to sort and move each task after execution the following model is used:

$$T_{Ri,j} = T_{i,j} + \frac{W_i + D}{S_{i,j}} \quad (3)$$

where: $T_{Ri,j}$ – the sorting time for the robot i packaging j type. This variable represents the sorting time that has already been spent on a given robot for a given type of packaging;

W_i – the distance of the working zone for the robot i . This is the fixed time it takes the robot to process one package;

D – distance of the working area for the robot. This is the distance the robot can travel per unit time;

$S_{i,j}$ – execution speed sorting tasks for the robot i packaging j type. This is an indicator that determines how quickly a robot can process a package.

This equation represents a model of sorting time for a specific robot and package type. It takes into account the fixed execution time of the sorting task, the distance between tasks, and the speed of task execution. The increase in sorting time $T_{i,j}$ occurs in accordance with the task completion time, distance and speed of the robot.

After completing the sorting task, it is necessary to update the number of packages of each type, as represented in the following model:

$$M_j = M_{j-1} - 1 \quad (4)$$

where: M_j – the number of packages j type after the sorting task is completed. This represents the remainder of the type j tasks after sorting is completed;

M_{j-1} – number of packages j type the before performing the sorting task. This represents the initial number of tasks of the type j before sorting

That is, model (4) describes how the number of packages j type changes after the sorting task is completed. The number of tasks after sorting (M_j) becomes equal to the number of tasks before sorting (M_{j-1}).

Mathematical models (1–4) describe the principle and sequence of operation of the Load Balancing algorithm in the context of load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry.

They take into account the parameters of sorting time, task execution speed, working and dead zone distances, ensuring optimization of the sorting process.

In general, the Load Balancing algorithm has the following structure, which is presented in Figure 1.

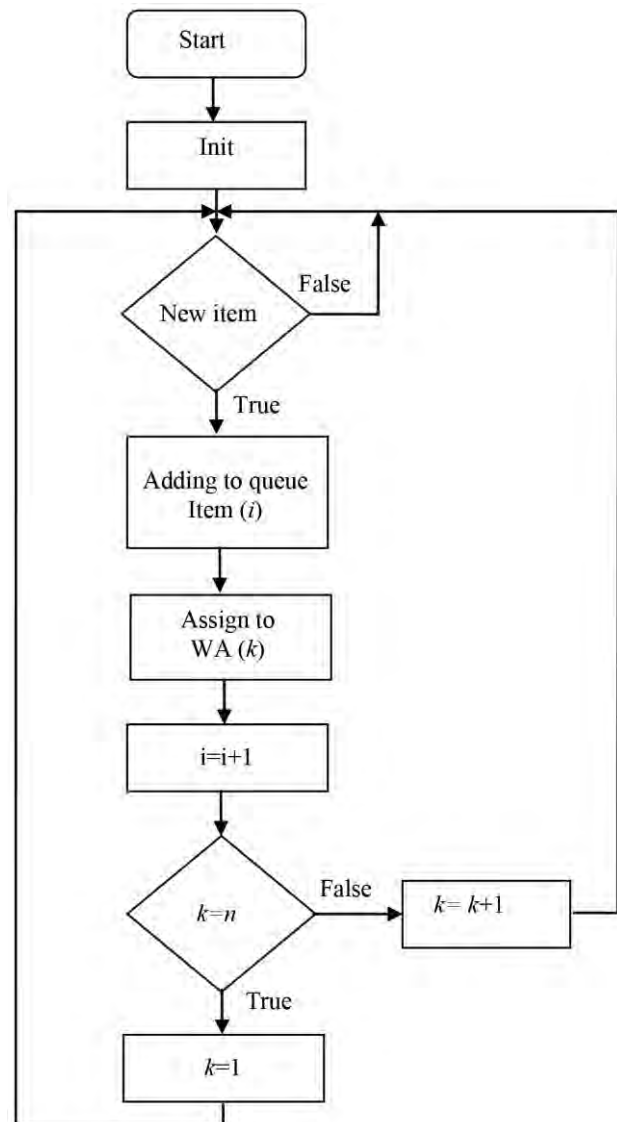


Fig. 1. General view of the Load Balancing algorithm for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry: i – position index; k – work area index; n – work area number; WA – selected work area

Further a fragment of the Load Balancing algorithm implementation for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry is presented based on the mass simulation language on GPSS. There are following input conditions: 3 types of packages, 50 pieces each, fall onto a conveyor belt that moves at a speed of 1 m/s. In the process of sorting

from a common conveyor line, 3 sorting robots are involved, each of them performs sorting with the following time parameters: 20+-4s, 32+-8s, 29+-10s. The total system simulation time is 5000s.

```

GENERATE 50,50,50      ; Each type packages generation
CONVEY Type1,1         ; Sending type 1 packages to the conveyor
CONVEY Type2,1         ; Sending type 2 packages to the conveyor
CONVEY Type3,1         ; Sending type 3 packages to the conveyor
START 1                ; Starting the conveyor

ROBOT1 STORAGE 1      ; Declaring a storage area for robot 1
ROBOT2 STORAGE 1      ; Declaring a storage area for robot 2
ROBOT3 STORAGE 1      ; Declaring a storage area for robot 3

ROBOT1 ASSIGN 20,4     ; Assigning time parameters for the robot 1
ROBOT2 ASSIGN 32,8     ; Assigning time parameters for the robot 2
ROBOT3 ASSIGN 29,10    ; Assigning time parameters for the robot 3

MAIN ADVANCE 5000      ; Total simulation time
TERMINATE              ; Completing the simulation

Type1 UNIFORM 20,24    ; Generating processing time for package type 1
Type2 UNIFORM 32,40    ; Generating processing time for package type2
Type3 UNIFORM 29,39    ; Generating processing time for package type3

TRANSFER 1            ; Go to the beginning of the conveyor

```

3. The operation principle of the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm in terms of its application for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry

The main difference between the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm and the Load Balancing (LB) algorithm above is that LB strives for overall performance improvements, while ATC focuses on adapting to the dynamics of the task environment, making the LB algorithm suitable for stable scenarios work on conveyor lines, where changes in the process are rare and predictable, and the ATC algorithm is effective in conditions where frequent changes in task priorities and robot load are possible.

The mathematical representation in the form of models and principles, the sequence of operation of the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm within the framework of these studies can be presented in next way. Let's describe the main parameters: $T_{i,j}$ – sorting time for a packaging type j robot i ; W_i – task weight; D – distance between tasks and conveyor lines; S_i – speed of completing a sorting task for the robot i ; M_j – maximum robot j load. Then the computer time model for sorting the Adaptive Task Completion (ATC)

algorithm can be represented by model (1). Let us carry out a mathematical description of the parameters for model (1). The weight of each task can be determined according to priority, urgency or other parameters and can be represented as:

$$W_i (1 \leq i \leq N)$$

The distance to the task, which may depend on the location of the robot and the location of the task, can be described by the following expression:

$$D (1 \leq i \leq N)$$

The speed of the robot when performing a task i can be described by the following expression:

$$S_i (1 \leq i \leq N)$$

The next step of the ATC algorithm is to solve the ranking problem, that is, the process of determining the priority of tasks based on their weight W_i , urgency or other parameters, which may include comparing the weights of tasks and ordering them in descending order of priority. This can be represented mathematically by the following model:

$$P_{i,j} = f(W_i, D, \dots) \quad (5)$$

$P_{i,j}$ – task i priority for the robot j ;

i – task number;

j – robot number.

As an example, we can use multi-criteria ranking in the context of ongoing research, then model 8 can be represented in next way:

$$F_{ij} = w_1 \cdot C_1(W_i, D, \dots) + w_2 \cdot C_2(W_i, D, \dots) + \dots + w_k \cdot C_k(W_i, D, \dots) \quad (6)$$

where: C_k – separate criteria;

w_k – weight.

It is worth noting that an example of a criterion in this context can be: task weight (W_i), distance to task (D), urgency of task completion, availability of resources and other parameters.

Weights (w_k) may reflect the relative importance of each criterion. The sum of the weights can be written as follows:

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (7)$$

As an example, let's give a representation of the priority function, let's say C_1 represents the weight of the task, and C_2 is the inverse distance, then the priority function based on models 8 and 9 can be:

$$P_{ij} = w_1 \cdot W_i + w_2 \cdot \frac{1}{D} \quad (8)$$

Thus, the mathematical description of multi-criteria ranking includes determining the priority function based on various criteria and their weights, which provides a more flexible and adaptive selection of tasks for robots within the ATC algorithm.

From here, for each task, an available robot is selected with $0 \leftarrow T_{i,j}$, if it is a robot with $M_j \rightarrow \max$, then the task is transferred to the next available robot.

Trailer sorting occurs: the selected robot performs the selected task according to the execution time ($T_{i,j}$), after which the maximum robot load (M_j) is updated.

The process is repeated for all tasks until the work is completed.

This method balances the load on the robots, allowing tasks to be completed efficiently while taking into account the robots' weights and speeds.

Maximum load settings ensure that robots are not overloaded and ensure that tasks are evenly distributed among them.

In general, the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm has the following structure, which is presented in Figure 2.

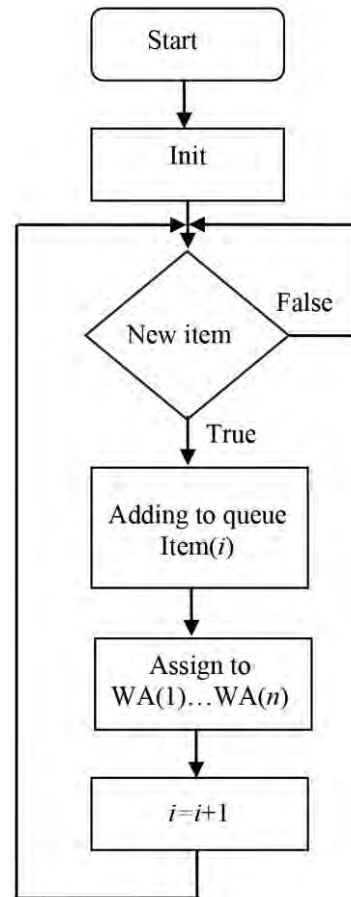


Fig. 2. General view of the Adaptive Task Completion (ATC) algorithm for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry: i – position index; k – work area index; n – work area number; WA – selected work area

Fragment of the Adaptive Task Completion algorithm implementation for load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry based on the mass simulation language on GPSS:

```

GENERATE 150, 1 ; Package flow generation
QUEUE Line ; Queue of packages on a conveyor

CONVEYOR Line, 1 ; Conveyor belt with a speed of 1 m/s

ROBOT Sorter1, 20, 4 ; Robot-sorter 1
ROBOT Sorter2, 32, 8 ; Robot-sorter 2
  
```


ROBOT Sorter3, 29, 10	; Robot-sorter 3
START	; Start
SEIZE Sorter1	; Robot 1 takes the packaging
DEPART Line	; Packaging leaves the conveyor
ADVANCE 0, UNIFORM(20, 4)	; Robot 1 sorts
RELEASE Sorter1	; Robot 1 releases the package
SEIZE Sorter2	; Robot 2 takes the packaging
DEPART Line	; Packaging leaves the conveyor
ADVANCE 0, UNIFORM(32, 8)	; Robot 2 sorts
RELEASE Sorter2	; Robot 2 releases the package
SEIZE Sorter3	; Robot 3 takes the packaging
DEPART Line	; Packaging leaves the conveyor
ADVANCE 0, UNIFORM(29, 10)	; Robot 3 sorts
RELEASE Sorter3	; Robot 3 releases the package
TERMINATE 1	; End

Having conducted several experiments to simulate the operation of the Adaptive Task Completion (ATC) and Load Balancing (LB) algorithms from the point of view of their application to solving

the problem of load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical industry, the following conclusions were obtained, which are presented in the table 2.

Table 2. Comparison of the advantages and disadvantages of the LB and ATC algorithms in terms of their application to solving the problem of load balancing on conveyor lines with sorting robots in the pharmaceutical Industry

Criteria	Algorithm	
	Load Balancing (LB)	Adaptive Task Completion (ATC)
<i>Advantages</i>		
Even load	Even distribution of tasks among robots.	Adaptive balancing that takes into account changing conditions.
Ease of implementation	Relatively easy to implement and understand	Highly flexible and adaptable.
Stability	Suitable for stable conditions without sudden changes.	Effective under dynamic change and uncertainty.
<i>Disadvantages</i>		
Flexibility	May not adapt to changing conditions.	Complex parameter settings may be required.
Lack of adaptation	Does not respond to changes in conditions and performance.	Requires more computing resources
Possibility of downtime	In case of uneven performance, overload of some robots and downtime of others may occur.	It may be difficult to configure and adapt parameters for optimization.

Conclusion

The Adaptive Task Completion (ATC) algorithm and the Load Balancing (LB) algorithm are two different approaches for load balancing on robotic sorting conveyor lines in the pharmaceutical industry. ATC is based on multi-criteria ranking of tasks and dynamic adaptation to the current load. This method takes into account not only the task completion time, but also other criteria, which makes it possible to respond more flexibly to changing conditions and improves balancing efficiency. LB, on the other hand, takes a greedy balancing approach, aiming to minimize the total sorting

time. This algorithm is focused on the current situation and, at each step, selects the optimal robot to perform the next task. In the context of the pharmaceutical field, where not only speed but also sorting accuracy is important, ATC may be the preferred choice as it takes into account various criteria and dynamically responds to changing conditions. On the other hand, LB can be effective in environments where sorting speed is of utmost importance and tasks are homogeneous. Thus, the choice between ATC and LB depends on the specific requirements and operation of the pharmaceutical sorting line, giving the choice between flexibility and time optimization.

References

1. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2022), "A Robotic Prosthetic a Control System and a Structural Diagram Development". *Collection of scientific papers "ΑΙΟΓΟΣ"*. P. 113–114. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.33>
2. Maksymova, S., Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Klymenko, O., & Vzhesniewski, M. (2023), "Shuttle-based storage and retrieval system 3d model improvement and development". *Journal of Natural Sciences and Technologies*, 2(2), P. 232–237. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10354730>
3. Yevsieiev, V., Nevliudov, I., Maksymova, S., O. Omarov, M., Klymenko, O. (2023), "Conveyor Belt Object Identification: Mathematical, Algorithmic, and Software Support". *Appl. Math. Inf. Sci.* №17(6). P. 1073–1088. DOI: [10.18576/amis/170615](https://doi.org/10.18576/amis/170615)
4. Xavier, Delorme, Paolo, Gianessi (2023), "Line balancing and task scheduling to minimise power peak of reconfigurable manufacturing systems". *International Journal of Production Research*. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2283568>
5. Rico, Walter, Philipp, Schulze, Armin, Scholl (2021), "ALSA: Combining branch-and-bound with dynamic programming to smoothen workloads in simple assembly line balancing". *European Journal of Operational Research*. №295(3). P. 857–873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.021>
6. Li, Z., Janardhanan, M. & Ponnambalam, S. (2021), "Cost-oriented robotic assembly line balancing problem with setup times: multi-objective algorithms". *J Intell Manuf.* 32. P. 989–1007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01598-7>
7. Zeynel, Abidin Çil, Hande, Öztop, Zülal, Diri Kenger, Damla, Kizilay (2023), "Integrating distributed disassembly line balancing and vehicle routing problem in supply chain: Integer programming, constraint programming, and heuristic algorithms". *International Journal of Production Economics*. Vol. 265. 109014 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109014>
8. Li, Ming-Liang (2021), "An Algorithm for Arranging Operators to Balance Assembly Lines and Reduce Operator Training Time". *Applied Sciences*. 11(18). 8544 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188544>
9. Bolu, Ali, Korçak, Ömer (2021), "Adaptive task planning for multi-robot smart warehouse". *IEEE Access*, Vol. 9. P. 27346–27358. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3058190](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058190)
10. Schmidbauer, C., Schlund, S., Ionescu, T. B., Hader, B. (2020), "Adaptive task sharing in human-robot interaction in assembly". In: *2020 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management (IEEM)*. IEEE. P. 546–550. DOI: [10.1109/IEEM45057.2020.9309971](https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309971)
11. YU, Xinbo, Li, B., He, W., Feng, Y., Cheng, L., Silvestre, C. (2021), "Adaptive-constrained impedance control for human-robot co-transportation". *IEEE transactions on cybernetics*. Vol. 52(12). P. 13237–13249. DOI: [10.1109/TCYB.2021.3107357](https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3107357)
12. Seenu, N., RM, K. C., Ramya, M. M., Janardhanan, M. N. (2020), "Review on state-of-the-art dynamic task allocation strategies for multiple-robot systems". *Industrial Robot: the international journal of robotics research and Application*. Vol. 47(6). P. 929–942. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-04-2020-0073>
13. Chutima, Parames (2022), "A comprehensive review of robotic assembly line balancing problem". *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 33(1). P. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01641-7>
14. Alitappeh, Reza Javanmard, Jeddisaravi, Kossar (2022), "Multi-robot exploration in task allocation problem". *Applied Intelligence*, Vol. 52(2). P. 2189–2211. DOI <https://doi.org/10.1007/s10489-021-02483-3>
15. Li, Zixiang, Janardhanan, Mukund Nilakantan, Tang, Qiuhua (2021), "Multi-objective migrating bird optimization algorithm for cost-oriented assembly line balancing problem with collaborative robots". *Neural Computing and Applications*. Vol. 33. P. 8575–8596. DOI <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05610-2>

Received 23.01.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Невлиудов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Євсєєв Владислав Вячеславович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7085>

Максимова Світлана Святославівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: svitlana.milyutina@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1375-9337>

Клименко Олександр Миколайович – генеральний директор, ТОВ "Kapelou", Київ, Україна; Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: kan@kapelou.com.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5277-138X>

Nevliudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Yevsieiev Vladyslav – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Maksymova Svitlana – Phd (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Klymenko Oleksandr – Managing Direktor LLC KAPELOU, Kharkiv National University of Radio Electronics, post-graduate student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ "БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ" ТА "АДАПТИВНЕ ВИКОНАННЯ ЗАВДАНЬ" НА ФАРМАЦЕВТИЧНОМУ СОРТУВАЛЬНОМУ КОНВЕЄРІ

Предметом дослідження в статті є переваги та недоліки застосування алгоритмів "балансування навантаження" та "адаптивне виконання завдань" на фармацевтичному сортувальному конвеєрі. **Мета роботи** – проаналізувати переваги та недоліки алгоритмів сортування *Load Balancing* (LB) та *Adaptive Task Completion* (ATC) для оптимізації та підвищення ефективності процесів сортування фармацевтичних виробів. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз останніх досліджень і публікацій з окресленої теми; вивчення особливостей застосування алгоритмів для сортування фармацевтичних виробів на конвеєрних лініях для балансування навантаження на роботів-сортувальників; аналіз алгоритму *Load Balancing* (LB) з погляду його застосування для балансування навантаження на конвеєрних лініях з роботами-сортувальниками у сфері фармацевтики; розроблення алгоритму *Load Balancing* для балансування навантаження на конвеєрних лініях з роботами-сортувальниками у фармацевтичній сфері; аналіз алгоритму *Adaptive Task Completion* (ATC) з погляду його застосування для балансування навантаження на конвеєрних лініях з роботами-сортувальниками у сфері фармацевтики; розроблення загального алгоритму *Adaptive Task Completion* (ATC) для балансування навантаження на конвеєрних лініях з роботами-сортувальниками у фармацевтичній сфері; виокремлення переваг та недоліків вказаних алгоритмів. Упроваджується метод імітаційного моделювання. Здобуто такі **результати**: сформульовано переваги та недоліки алгоритмів *Load Balancing* та *Adaptive Task Completion* для балансування навантаження на конвеєрних лініях з роботами-сортувальниками у фармацевтичній сфері; надано рекомендації, в яких ситуаціях, за яких передумов, який алгоритм необхідно використовувати. **Висновки.** У контексті фармацевтичної галузі, де важливі не лише швидкість, а й точність сортування, *Adaptive Task Completion* може бути кращим вибором, оскільки він бере до уваги різні критерії та динамічно реагує на мінливі умови. З іншого боку, *Load Balancing* може бути ефективним у ситуаціях, коли швидкість сортування має першорядне значення та завдання однорідні.

Ключові слова: Індустрія 4.0; Розумне виробництво; Логістика 4.0; Складське господарство 4.0; Балансування навантаження; Адаптивне виконання завдань.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Євсєєв В. В., Максимова С. С., Клименко О. М. Реалізація алгоритмів "балансування навантаження" та "адаптивне виконання завдань" на фармацевтичному сортувальному конвеєрі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>

Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Klymenko, O. (2024), "The "load balancing" and "adaptive task completion" algorithms implementation on a pharmaceutical sorting conveyor line", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 154–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.154>

Г. ТЕРЕЩЕНКО, І. КИРИЧЕНКО

АНАЛІЗ І ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАЯВНИХ БЛОКЧЕЙН-РІШЕНЬ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЦИФРОВИХ АКТИВІВ

Предметом дослідження є вивчення сучасних блокчейн-рішень та їх потенційне використання в контексті захисту цифрових активів. Аналізуються різні аспекти технологій блокчейн, зокрема механізми консенсусу, рівень безпеки та функціональні можливості. **Мета роботи** – системний аналіз і обґрунтування застосування різних блокчейн-рішень для захисту цифрових активів. Стаття спрямована на визначення ефективності та доцільності використання конкретних блокчейн-протоколів та їх функціональних елементів для забезпечення безпеки, надійності та цілісності цифрових активів. У статті розв’язуються такі **завдання**: розгляд сучасних блокчейн-технологій та їх ролі в забезпеченні безпеки цифрових активів; детальний аналіз популярних блокчейн-протоколів, зокрема *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric*, з огляду на їх захищеність від різних видів кіберзагроз і атак. Упроваджуються такі **методи**: аналіз блокчейн-протоколів, експертне оцінювання ефективності захисту цифрових активів і вивчення технічних особливостей кожного рішення. **Досягнуті результати**: визначено переваги й недоліки кожного протоколу, зважаючи на їх використання у сфері цифрових активів у різноманітних напрямках застосування, таких як семантичний аналіз текстів, *E-Learning*, *Big Data*, *DDP*-системи, фінанси тощо; додатково досліджено питання приватності мереж у контексті захисту інформації та обґрунтовано вибір оптимального блокчейн-рішення для конкретного використання. **Висновки**. Стаття надає узагальнену уяву про те, як ефективно використовувати блокчейн для забезпечення надійності та безпеки цифрових активів у різних сценаріях застосування. У сучасному цифровому світі, де значення цифрових активів зростає експоненційно, їх захист від кіберзагроз стає критичним завданням. Блокчейн-технології, спочатку розроблені для криптовалют, набули визнання як ефективний інструмент у сфері кібербезпеки. Доведено важливість стандартизації та регулювання в галузі блокчейн-технологій з метою їх ефективної інтеграції та відповідності до вимог законодавства.

Ключові слова: блокчейн; кібербезпека; цифрові активи; анонімність; конфіденційність; швидкість транзакцій; стандартизація; регулювання.

Вступ

У сучасному цифровому світі, де цифрові активи стають усе більш важливими, захист їх від кіберзагроз стає актуальною проблемою. Блокчейн-технології, що вперше з’явилися одночасно з криптовалютами, набувають популярності в забезпеченні безпеки цифрових активів. Мета цього дослідження – проаналізувати та обґрунтувати використання наявних блокчейн-рішень для захисту цифрових активів.

З поширенням цифрових активів у всіх сферах суспільства – від фінансів до технологій та медицини – виникає необхідність ефективного захисту цих активів від кіберзагроз. Кібератаки стають усе більш удосконаленими, і традиційні методи безпеки часто виявляються недостатніми перед новітніми загрозами. У цьому контексті блокчейн-технології набувають значущості, пропонуючи новий підхід до забезпечення безпеки цифрових активів. Блокчейн, спочатку розроблений для забезпечення безпеки транзакцій з криптовалютами, став платформою для розвитку різного застосування

у сфері кібербезпеки. Його основна сутність полягає в тому, що дані розподілені та не можуть бути змінені без згоди всіх учасників мережі. Це робить блокчейн украй важливим інструментом для захисту цифрових активів. Він використовує криптографічні методи для створення безпечних і недоступних для зміни блоків інформації, що зберігається в розподіленій мережі. Це створює високий рівень безпеки та надійності. Історія транзакцій у ланцюжку блоків є в кожного учасника системи, і будь-яка спроба змінити наявний блок вимагає консенсусу більшості мережі.

За останні роки розроблено безліч блокчейн-рішень, спрямованих на різні аспекти захисту цифрових активів. Блокчейн застосовується в багатьох сферах – від платіжних систем із використанням смарт-контрактів до систем ідентифікації осіб і управління доступом. Один із важливих напрямів – це впровадження блокчейну для створення децентралізованих ідентифікаційних систем. Такі системи зменшують ризик витоку особистої інформації, оскільки кожен користувач має контроль над своєю ідентичністю. Смарт-

контракти в блокчейні також можуть забезпечити безпеку та автоматизацію виконання угод, уникнувши інтервенції третіх сторін.

Ще однією важливою характеристикою блокчейну є його прозорість. Відкритість і доступність для всіх учасників мережі дають змогу ефективно виявляти та вирішувати потенційні проблеми безпеки. Колективна природа блокчейн-мережі дозволяє виявляти аномалії та кібератаки швидше, порівняно з традиційними централізованими системами. Безпека також підсилюється тим, що дані в блокчейні зберігаються децентралізовано та не мають єдиного центрального пункту вразливості. Зламання одного вузла не призводить до втрати інформації чи порушення безпеки всієї мережі. Глибокий аналіз різноманітних блокчейн-рішень, призначених для захисту цифрових активів, – важлива частина такого захисту. Завдання передбачають детальний огляд різних блокчейн-протоколів, їх переваг і обмежень у контексті кібербезпеки. Дослідження також орієнтоване на ідентифікацію найбільш ефективних та оптимальних рішень для різних сфер використання цифрових активів. Дуже важливим стає розуміння та застосування комплексних блокчейн-технологій для захисту цифрових активів.

Інноваційність блокчейн-технологій у захисті цифрових активів визначає нові горизонти для фінансової та технологічної революції. Аналіз наявних рішень і виокремлення перспектив показують, що сучасні виклики можуть стати стимулом для подальшого розвитку та впровадження інноваційних технологій, що покращать захист цифрових активів і розширяють можливості їх використання. Застосування цих інноваційних рішень може виявитися вирішальним для надійності та безпеки в деяких найважливіших секторах цифрового світу. У статті буде проаналізовано різноманітні блокчейн-протоколи, їх ефективність у захисті цифрових активів, а також результати проведених експериментів та дискусії про досягнуті висновки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нині існує значна кількість досліджень і наукових публікацій, спрямованих на вивчення та вдосконалення блокчейн-технологій для захисту цифрових активів. Цей аналіз ставить за мету висвітлити ключові аспекти останніх розробок та студій у цій сфері. Робота [1] є важливим внеском

у розумінні ефективності блокчейну для кібербезпеки. Авторі наголошують на тому, що блокчейн може стати оптимальним інструментом для підвищення рівня захисту від різноманітних кіберзагроз. У дослідженні вивчається роль блокчейну в забезпеченні цілісності та конфіденційності інформації, а також у виявленні та мінімізації ризиків кібератак. У згаданій роботі сформульовано висновок про те, що застосування блокчейну дає змогу створити безпечну та невразливу інфраструктуру для зберігання та оброблення цифрових активів, а також важливо брати до уваги, що блокчейн не є універсальним засобом захисту і має бути інтегрованим у комплексні кіберзахисні стратегії.

У дослідженні [2] проаналізовано різноманітні блокчейн-протоколи та їх ефективність у захисті цифрових активів. Авторі докладно вивчають протоколи, такі як *Bitcoin*, *Ethereum*, та розглядають їх застосування в конкретних ситуаціях, починаючи від фінансових транзакцій до управління правами доступу. Висновки щодо цієї праці вказують на різноманітність блокчейн-протоколів та їх здатність адаптуватися до різних потреб у сфері захисту цифрових активів. Однак автори зосереджують увагу на необхідності вибору правильного протоколу залежно від конкретного застосування та бізнес-вимог. Аналіз двох публікацій дає змогу сформулювати важливі висновки. По-перше, блокчейн-технології є ефективним інструментом для захисту цифрових активів, зокрема у сфері кібербезпеки. По-друге, різноманітність блокчейн-протоколів дає змогу обрати найбільш оптимальний протокол для конкретних вимог та умов застосування.

На основі аналізу публікацій [3] можна визначити дві основні тенденції. По-перше, зростання інтересу до блокчейну як ефективного інструменту для захисту цифрових активів. По-друге, постійний пошук оптимальних блокчейн-рішень, які зважають на конкретні потреби та вимоги різних галузей. Дослідження та публікації в галузі використання блокчейну для захисту цифрових активів вказують на значний потенціал цієї технології. Проте важливо пам'ятати, що успіх упровадження блокчейну залежить від правильного вибору протоколу, а також від особливих вимог кожного конкретного застосування. У подальших дослідженнях важливо спрямувати зусилля на оптимізацію та адаптацію блокчейн-рішень для різноманітних викликів у галузі цифрових активів і кібербезпеки.

Визначення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

У сучасному світі, де цифрові активи стають ключовим елементом економіки та зростають кількісно і якісно, захист їх від кіберзагроз стає актуальною та нагальною проблемою [4]. Незважаючи на широке застосування різних методів та засобів кібербезпеки, існують нерозв'язані питання, що потребують новаторського підходу.

Блокчейн-рішення часто стикаються з проблемами, пов'язаними з анонімністю та конфіденційністю. Витік особистої конфіденційної інформації залишається невирішеним питанням, що обмежує придатність блокчейн-технологій у деяких сферах. З погляду швидкості та масштабованості наявні рішення можуть виявитися неефективними у великих мережах або за умови значного обсягу транзакцій. Розв'язання цих питань потребує подальших досліджень та інновацій. Відсутність єдиних стандартів взаємодії блокчейн-мереж і недостатнє регулювання в галузі криптовалют і цифрових активів у багатьох країнах створюють правові та економічні ризики для учасників цієї екосистеми [5]. Аналіз та обґрунтування використання блокчейн-рішень для захисту цифрових активів проводиться з огляду на досі не розв'язані аспекти кібербезпеки.

У дослідженні реалізується низка конкретних завдань. Проаналізувати сучасні публікації та наукові роботи з використання блокчейн-технологій у захисті цифрових активів, і виявити їх слабкі аспекти та невирішені питання. Докладно розглянути наявні блокчейн-рішення, зокрема *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric*, виявити їх переваги та недоліки, а також визначити, наскільки вони розв'язують сучасні проблеми.

Важливо в цій роботі проаналізувати та оцінити ефективність блокчейн-рішень у контексті захисту цифрових активів, зокрема аспекти анонімності, конфіденційності, швидкості та масштабованості. Необхідно застосувати розроблену методику проведення майбутніх експериментів із використанням різних блокчейн-рішень у реальних умовах та зібрати інформацію для подальшого вивчення. У статті також потрібно оцінити результати аналізу, щоб визначити переваги й недоліки кожного рішення, висвітлити проблемні аспекти, а також надати рекомендації для подальших досліджень та розвитку блокчейн-технологій у сфері кібербезпеки.

Перелічені завдання статті спрямовані на глибокий аналіз та розроблення новаторських підходів для вирішення не розв'язаних раніше питань щодо захисту цифрових активів за допомогою блокчейн-технологій.

Методи та матеріали

Для виконання окреслених завдань упроваджувалися методи аналізу блокчейн-протоколів, експертне оцінювання ефективності захисту цифрових активів і вивчення технічних особливостей кожного рішення. Здійснено систематичний огляд різних блокчейн-протоколів, зокрема *Bitcoin*, *Ethereum*, *Hyperledger* тощо. Докладно розглянуто їх структуру, принципи консенсусу, масштабованість та рівень безпеки. Цей етап передбачав аналіз транзакційної швидкості, можливостей смарт-контрактів і механізмів консенсусу кожного протоколу. Експерти з кібербезпеки використовували свої знання для оцінювання ефективності блокчейн-рішень у захисті цифрових активів. Застосовувалися методи експертного оцінювання, зважаючи на такі фактори, як витрати на енергію, можливість виявлення кібератак та їх протидії, анонімність та інші параметри [6].

Блокчейн-мережа *Bitcoin* є децентралізованою системою для обміну цифрових валют. Цей блокчейн використовується для запису та підтвердження всіх транзакцій, виконаних у криптовалюті *Bitcoin (BTC)*. Основна мета – забезпечити безпеку та довіру у фінансових операціях, уникаючи потреби в централізованому фінансовому посередництві.

Перелічимо ключові властивості блокчейн-мережі *Bitcoin*.

– Децентралізація: відсутність центрального органу контролю. Усі вузли (комп'ютери) мережі рівноправні.

– Транзакції: кожна транзакція позначається в блоках і підтверджується мережею за допомогою процесу, відомого як "майнінг".

– Майнінг: майнери розв'язують складні математичні задачі для підтвердження транзакцій та створення нових блоків.

– Криптографія: використання криптографічних методів для забезпечення безпеки та анонімності транзакцій.

– Блокчейн: сполучення блоків транзакцій у ланцюг, де кожен блок містить хеш попереднього, створюючи непорушний запис.

– Доступність: можливість використання *Bitcoin* для переказу вартості навіть без звичайного банківського облікового запису.

Блокчейн-мережа *Bitcoin* відома своєю надійністю та відсутністю централізованого контролю, забезпечує глобальний доступ до фінансових послуг і прозорість операцій.

Ethereum – це децентралізована блокчейн-мережа, яка не лише дає змогу передавати цифрові валюти (*ETH*), але й використовується для розгортання смарт-контрактів і децентралізованих застосунків (*DApps*). Ця мережа розроблена для створення більш широкого спектра децентралізованих послуг і платформ.

Наведемо основні характеристики блокчейн-мережі *Ethereum*.

– Смарт-контракти: програми, що автоматизують і виконують угоди на основі умов, записаних у блокчейні, розширюючи можливості використання технології.

– Ефір (*Ether*): офіційна криптовалюта *Ethereum*, що застосовується для оплати транзакцій та винагороди майнерам.

– Децентралізовані застосунки (*DApps*): платформа, яка дає змогу розробникам створювати застосунки без централізованого управління чи контролю.

– Майнінг: процес вирішення складних завдань для підтвердження транзакцій та створення нових блоків.

– *ERC-20* токени: стандарт для створення та взаємодії з токенами на основі *Ethereum*, що розширює функціонал мережі.

– Децентралізовані автономні організації (*DAO*): структури, що дозволяють спільноті приймати рішення та керувати ресурсами без централізованого управління.

– Технічна гнучкість: *Ethereum* дає змогу впроваджувати та вдосконалювати протоколи через хардфорки (*hard forks*).

Ethereum відомий своєю гнучкістю та можливістю створення складних застосунків та фінансових інструментів, що виходять за межі простого обміну вартості [7].

Hyperledger Fabric – це високопродуктивний, децентралізований блокчейн-протокол, призначений для використання в корпоративних середовищах. Він розроблений *Linux Foundation* і надає потужність для розроблення децентралізованих застосунків та розгортання смарт-контрактів у бізнес-середовищах.

Перелічимо основні особливості *Hyperledger Fabric*.

– Дозвілля та приватність: *Hyperledger Fabric* дає змогу налаштувати рівень доступу та конфіденційності для різних учасників мережі, забезпечуючи дозвіл на конкретні транзакції.

– Модульність і гнучкість: протокол дозволяє використовувати різні алгоритми консенсусу, розумні контракти та системи легітимації, щоб адаптувати мережу до конкретних потреб підприємства.

– Колекції даних: *Hyperledger Fabric* підтримує колекції даних, що дають змогу групам учасників обмінювати обмежені дані без їх розкритості всій мережі.

– Легкість управління: мережі *Hyperledger Fabric* можна легко розгортати та керувати ними, забезпечуючи ефективне управління, зважаючи на бізнес-процеси.

– Підтримка компаній: розроблений з огляду на потреби підприємств, *Hyperledger Fabric* дає змогу створювати застосунки для підприємств і забезпечує високу пропускну здатність.

– Довіра й безпека: мережі *Hyperledger Fabric* використовують консенсус за допомогою практик *Proof-of-Work*, що робить їх надійними та стійкими до змов і атак.

Hyperledger Fabric – популярний вибір для підприємств, що шукають блокчейн-рішення, орієнтовані на децентралізацію та безпеку для своїх бізнес-операцій.

Докладне вивчення технічних особливостей кожного рішення передбачало розгляд конфігурацій блокчейн-мережі, алгоритмів шифрування, механізмів контролю доступу та систем управління ключами. Зокрема зверталася увага на інтеграцію з наявними системами, адаптивність до змін у кіберзагрозах і здатність до масштабування [7].

Сучасний розвиток технологій ставить перед собою завдання вдосконалити процеси оброблення, зокрема в питаннях аналізу тексту в контексті семантичного аналізу [8]. Дослідження щодо можливого використання наявних блокчейн-рішень у семантичному обробленні тексту та їх ролі в класичному процесі оброблення зведено в табл. 1.

Отже, використання наявних блокчейн-рішень може значно покращити процес семантичного аналізу тексту. *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric* пропонують унікальні можливості для безпечного та ефективного обміну семантичною інформацією,

а їх механізми консенсусу та смарт-контракти додають новітні функціональності до класичного процесу оброблення тексту. Упровадження цих технологій може визначити нові стандарти в галузі семантичного аналізу та покращити надійність і ефективність оброблення текстової інформації.

Зберігання та обмін знань також має ключове значення, особливо в програмних системах, де використання баз знань є невід'ємною частиною розроблення, – це все дуже важливо в сучасному світі [9]. Аналіз актуальних публікацій вказує на можливість застосування наявних блокчейн-рішень для оптимізації та підвищення ефективності повторного використання знань у програмних системах на основі баз знань (див. табл. 2).

Отже, використання блокчейн-технологій для оптимізації повторного застосування знань у програмних системах є перспективним напрямом. *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric* дають змогу створювати, поширювати та оптимізувати знання в безпечних, ефективних і децентралізованих умовах. Ця інноваційна архітектура може визначити нові стандарти в управлінні знаннями та підвищити продуктивність у сфері розроблення програмного забезпечення.

Важливо також зазначити, що сучасні технології, зокрема блокчейн, роблять значний внесок у різні сфери, зокрема аналітику, електронне навчання (*E-Learning*) та оброблення великих обсягів інформації (*Big Data*) [10]. Ця стаття аналізує також можливе використання наявних блокчейн-рішень у цих сферах та їх вплив на майбутнє вищої освіти (див. порівняльний аналіз у табл. 3).

Застосування технологій блокчейн має важливий вплив на розвиток вищої освіти. Блокчейн-технології використовують різноманітні інновації в атестації та навчанні, зокрема в дистанційному та децентралізованому. Забезпечення надійності та захисту інформації з допомогою блокчейн може покращити якість аналітичних звітів та впливати на прийняття стратегічних рішень. Використання блокчейн-технологій в *E-Learning* сприятиме створенню глобальних, децентралізованих платформ для навчання, розширює доступ до вищої освіти. Поєднання блокчейну з аналітикою *Big Data* може допомогти впроваджувати оптимальні рішення у вишах, зважаючи на потреби студентів і викладачів.

Таблиця 1. Блокчейн та семантичне оброблення тексту

	Bitcoin	Ethereum	Hyperledger Fabric
Механізми консенсусу та передовий семантичний аналіз	<i>Bitcoin PoW</i> : може використовуватися для підтвердження джерела інформації в семантичному аналізі, забезпечуючи надійність даних.	<i>Ethereum PoS</i> : забезпечує швидке та енергоефективне оброблення тексту в семантичних моделях.	<i>Hyperledger Fabric PBFT</i> : дає змогу побудувати обмежену мережу для обміну семантичною інформацією в корпоративних середовищах.
Смарт-контракти та автоматизований семантичний аналіз	Використовуються для автоматизації семантичного аналізу.	<i>Ethereum</i> смарт-контракти: застосовуються для автоматизації семантичного аналізу та виконання різних завдань з оброблення тексту без посередництва.	<i>Hyperledger Fabric</i> модульність: дає змогу розробляти та використовувати модульні рішення для спеціалізованого семантичного аналізу.
Збір та підготовка інформації	Забезпечують безпечний та надійний обмін текстовою інформацією за допомогою криптографічно захищених транзакцій.	Забезпечують безпечний та надійний обмін текстовою інформацією за допомогою криптографічно захищених транзакцій.	Гарантує приватність і конфіденційність інформації під час її збору та обміну нею.
Аналіз та витягнення інформації	Використання шляхом дослідження транзакційної історії. Публічний характер блокчейну дає змогу переважно створювати та застосовувати аналітичні інструменти для вивчення та розуміння руху криптовалюти і пов'язаної з ними інформації.	Застосовується для автоматичного витягнення та оброблення семантичної інформації з тексту.	Дає змогу забезпечити надійність і цілісність інформації під час аналізу.
Моделювання та оптимізація	Допомагає забезпечити розподілене оброблення та оптимізацію семантичного аналізу.	Забезпечує швидкість і високу масштабованість для оптимального моделювання текстової інформації.	Дає змогу оптимізувати семантичний аналіз, застосовуючи спеціалізовані модулі.

Таблиця 2. Блокчейн та його роль у системах знань

	Bitcoin	Ethereum	Hyperledger Fabric
Децентралізація зберігання знань	Можуть слугувати основою для децентралізованої бази знань, забезпечуючи високу доступність і стійкість до втрати інформації.	Можуть слугувати основою для децентралізованої бази знань, забезпечуючи високу доступність та стійкість до втрати інформації.	Може слугувати основою для створення децентралізованої системи зберігання знань, де інформація розподіляється між учасниками мережі. Смарт-контракти та модульна архітектура дають змогу створювати ефективні механізми обміну та верифікації знань без централізованого контролю.
Смарт-контракти та автоматизована логіка	Обмежений основними функціями переказу коштів, менш ефективний для реалізації складних автоматизованих логік.	Використовуються для автоматизації процесів оновлення та розширення бази знань без необхідності централізованого втручання.	Надає гнучкість у розробленні та використанні смарт-контрактів і автоматизованої логіки завдяки своїй модульності. Можливість програмування в <i>Java</i> або <i>Go</i> допомагає створювати розширені сценарії автоматизації та взаємодії між учасниками мережі.
Механізми консенсусу та гарантована цілісність даних	Використовує механізм консенсусу <i>Proof of Work (PoW)</i> , де майнери розв'язують складні математичні задачі для підтвердження транзакцій. Це забезпечує високий рівень цілісності даних та довіреність з допомогою децентралізованого підтвердження операцій.	Використовує <i>Proof of Stake (PoS)</i> та планує перейти на <i>Proof of Stake (PoS)</i> , що зменшить енерговитрати. Система смарт-контрактів <i>Ethereum</i> також допомагає гарантувати цілісність даних, дозволяючи програмовані правила виконання операцій у децентралізованому середовищі.	Забезпечує високий рівень гарантії цілісності та достовірності знань завдяки механізму консенсусу.
Збір та структурування знань	Дає змогу структурувати та збирати знання в блокчейні, забезпечуючи їх невразливість до вилучення чи зміни.	Дозволяє структурувати та збирати знання в блокчейні, забезпечуючи їх невразливість до вилучення чи зміни.	Допомагає створювати та управляти модульними блоками знань.
Обмін і поширення знань	Може використовуватися для обміну та поширення знань через мікроплатежі. Можливість невеликих транзакцій дає змогу користувачам оплачувати за контент, інформацію або послуги, сприяючи екосистемі децентралізованого обміну знань.	Забезпечує автоматичний обмін та поширення знань згідно з умовами смарт-контрактів.	Забезпечує безпечний та конфіденційний обмін знань у корпоративних умовах.
Аналіз та оптимізація знань	Гарантує, що знання в блокчейні залишаються стійкими до атак.	Забезпечує більш енергоефективне управління та оптимізацію знань у реальному часі.	Може бути використаний для створення децентралізованої системи аналізу та оптимізації знань. Забезпечуючи безпеку та конфіденційність, він дає змогу ефективно обробляти інформацію та обмінюватися нею між учасниками, сприяючи аналітиці та покращенню використання знань в організації.

Таблиця 3. Аналітика, E-Learning та Big Data в блокчейн

	Bitcoin	Ethereum	Hyperledger Fabric
Використання механізмів консенсусу для достовірності	Забезпечує достовірність даних у системах аналітики, де важлива надійність інформації.	Використовує механізм <i>Proof of Stake (PoS)</i> , де учасники, що мають стейк (у криптовалюти), мають шанс додати новий блок до ланцюга. Це забезпечує достовірність та безпеку мережі завдяки зацікавленості учасників у її надійності.	Застосовує механізм <i>Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)</i> , де учасники досягають консенсусу з допомогою взаємодії та підтвердження операцій. Цей метод забезпечує високий рівень достовірності, оскільки він узгоджується навіть за наявності нечесних учасників у мережі.
Захист і надійність інформації	Використовує <i>Proof of Work (PoW)</i> для забезпечення надійності інформації. Майнери вирішують складні математичні завдання, що підтверджує валідність транзакцій, та забезпечують надійність блокчейну завдяки децентралізованому консенсусу.	Дають змогу створювати автоматизовані захищені контракти для обміну аналітичною інформацією та її оброблення.	Застосовує <i>Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)</i> та інші механізми консенсусу. Це дає змогу досягти високий рівень надійності та захисту інформації в умовах децентралізованої мережі, навіть у разі нечесних учасників.
E-Learning	Може бути використаний у галузі для мікроплатежів, підтримки контенту та винагороди творців змісту. Можливість миттєвих транзакцій дає змогу створити ефективну систему оплати за навчальний матеріал.	Може бути використаний у галузі для мікроплатежів, підтримки контенту та винагороди творців змісту. Можливість миттєвих транзакцій дає змогу створити ефективну систему оплати за навчальний матеріал.	Забезпечує децентралізовану атестацію та зберігання документів у сфері <i>E-Learning</i> .
Відстеження прогресу та успішності	Використовується для створення непідробних і відстежуваних записів про успішність студентів. Застосовується для створення непідробних і відстежуваних записів про успішність студентів.	Застосовується для створення непідробних і відстежуваних записів про успішність студентів.	Може бути основою для створення децентралізованої системи відстеження прогресу та успішності студентів. Смарт-контракти та конфіденційність мережі дають змогу ефективно фіксувати та забезпечувати безпеку освітньої інформації, сприяючи об'єктивному визначенню успішності та покращенню навчального процесу.
Big Data	Може бути використаний для забезпечення безпеки та відстеження транзакцій. Може слугувати надійною основою для реєстрації та аудиту великих обсягів фінансової інформації.	Забезпечує захищений обмін великих обсягів персональної інформації в системах <i>Big Data</i> , дотримуючись принципів конфіденційності.	Може використовуватись для створення безпечних і прозорих мереж обміну інформацією між децентралізованими сторонами. Механізми консенсусу та конфіденційність <i>Hyperledger Fabric</i> роблять його ефективним для оброблення та обміну великими обсягами інформації.
Децентралізоване зберігання та оброблення інформації	Використовується для децентралізованого зберігання та оброблення фінансової інформації. Транзакції в блокчейні <i>Bitcoin</i> дозволяють ефективно та безпечно здійснювати операції із збереженням історії та цілісністю даних.	Застосовується для децентралізованого зберігання та оброблення різноманітної інформації, зокрема смарт-контракти. Система смарт-контрактів дає змогу автоматизовано обробляти інформацію та взаємодіяти з різними застосунками в безпечному середовищі.	Уможливує розгортання спеціалізованих модулів для ефективного оброблення великих обсягів інформації в різних галузях (модульність).

Отже, застосування блокчейн-технологій рішення можуть сприяти ефективності, надійності та глобальному доступу до навчання. За впровадженням цих технологій стоїть потенціал трансформувати перспективи для вищої освіти. Ці інноваційні

сучасну систему вищої освіти та створити динамічне середовище для студентів і викладачів.

Цікавою галуззю застосування блокчейн-технологій є цифрове середовище розподілених систем оброблення даних (*DDP*), де ефективне оброблення та управління значними обсягами інформації є важливим складником. Аналіз наявних блокчейн-рішень може відкрити нові перспективи для оптимізації цього цифрового середовища [11].

Ключові аспекти та можливості використання блокчейн-технологій у сучасних розподілених системах оброблення даних є в сучасних розподілених *DDP*-системах.

Bitcoin

– Надійність та безпека – використання *Proof of Work (PoW)* може забезпечити високий рівень надійності та безпеки в обробленні критичних даних у *DDP*.

– Швидкість та масштабованість – може бути оптимізований для швидкого та масштабованого оброблення великих обсягів інформації.

Ethereum

– Захист від порушень – *Ethereum Smart Contracts* – смарт-контракти дають змогу створювати правила для захисту від можливих порушень в обробленні інформації та автоматизують виконання угод.

– Забезпечення цілісності даних – *Proof of Stake (PoS)* забезпечують високу цілісність інформації, що є ключовим для точного аналізу великих її обсягів.

– Швидкість та масштабованість – може бути оптимізований для швидкого та масштабованого оброблення великих обсягів інформації.

Hyperledger Fabric

– Децентралізоване оброблення – механізм *Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)* у гіперланцюгу дає змогу ефективно обробляти інформацію, забезпечуючи децентралізацію та надійність.

– Взаємодія із системами *Big Data* – модульна архітектура допомагає інтегрувати блокчейн із системами оброблення великих обсягів інформації (*Big Data*).

Технології блокчейн мають важливий вплив на оброблення інформації, оскільки впроваджують різноманітні інновації в методах оброблення та аналізу. Застосування блокчейну відкриває шлях для інновацій у методах оброблення та аналізу

даних, сприяючи розвитку сучасних технологій. Використання блокчейн-технологій може підвищити рівень безпеки та надійності в управлінні великими обсягами інформації. Оптимізація оброблення інформації з допомогою блокчейн може значно покращити швидкість та ефективність роботи систем *DDP*. Інтеграція блокчейну із системами *Big Data* дасть змогу створити оптимізовані для великого обсягу інформації системи управління та взаємодії. Використання наявних блокчейн-рішень у сучасному цифровому середовищі розподілених систем оброблення даних має потенціал трансформувати спосіб управління та аналізу великих обсягів інформації. Упровадження цих технологій може покращити безпеку, надійність та швидкість оброблення інформації, що важливо для успішної функціональної цифрової екосистеми розподілених систем оброблення даних.

Аналіз сучасних блокчейн-систем передбачає розгортання різних рішень у контрольованих умовах. Транзакції, доступ та інші параметри проаналізовано для визначення ефективності та стійкості кожного протоколу. Результати аналізу подані в таблицях, зокрема порівняльний аналіз основних показників ефективності. Також узято до уваги різні сценарії використання та потенційні ризики кожного блокчейн-рішення. Розглянуто переваги та недоліки кожного рішення, а також визначено можливості подальших покращень [12]. На підставі проведеного аналізу зроблено висновки щодо ефективності та придатності блокчейн-рішень для захисту цифрових активів. Висновки доповнювалися рекомендаціями щодо вибору оптимального блокчейн-протоколу в конкретних умовах використання.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати основані на аналізі використання різних блокчейн-рішень у реальних умовах. Розглянуто такі параметри, як швидкість транзакцій, рівень анонімності, масштабованість та інші, що впливають на безпеку цифрових активів [13]. Вибір конкретних блокчейн-рішень здійснений на підставі попереднього аналізу, де були взяті до уваги їх технічні особливості та ефективність. Для експерименту обрано три різні блокчейн-протоколи: *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric*. Для кожного з них розгорнуто мережу в контрольованому середовищі. Забезпечено

надійність та безпеку роботи кожної мережі з огляду на ймовірні загрози та ризики. Під час експерименту проводилося постійне спостереження за роботою блокчейн-мереж із фіксуванням та аналізом кожної транзакції. Наголошено на необхідності впровадження інструментів моніторингу для визначення швидкості оброблення транзакцій та реакції мережі на високі навантаження. Визначено та реалізовано різні сценарії використання для кожного блокчейн-протоколу. Це передбачало проведення фінансових транзакцій, використання смарт-контрактів, а також взаємодію з іншими технологіями та сервісами. Особливу увагу приділено аналізу масштабованості кожної блокчейн-мережі. Аналізувалося збільшення навантаження для встановлення, як ефективно система справляється із зростанням обсягу транзакцій та забезпечує стабільність роботи. Для блокчейн-мереж, що підтримують анонімні транзакції, проведено вимірювання рівня анонімності. Вивчалися можливості інкогніто-транзакцій та ефективність захисту особистої інформації в контексті різних сценаріїв використання [14]. Необхідно зауважити, що збір даних має містити логи транзакцій, показники ефективності мережі, витрати на енергію та інші ключові параметри. Дані були систематично зібрані для подальшого детального аналізу, на підставі якого зроблено об'єктивні висновки щодо ефективності кожного блокчейн-протоколу в реальних умовах. Оцінювалися переваги та обмеження кожної системи в захисті цифрових активів і кібербезпеки. Усе це підтвердило ефективність використання блокчейн-рішень. Найбільш перспективними виявилися рішення, що поєднують високу швидкість транзакцій із високим рівнем безпеки та анонімності.

Один із ключових параметрів – швидкість транзакцій. *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric* були ретельно проаналізовані.

Параметри та аналіз блокчейн-мереж

Bitcoin

– Швидкість – має середню швидкість оброблення транзакцій, близько семи транзакцій за секунду (TPS).

– Механізм консенсусу – *Proof-of-Work (PoW)* – споживчий за ресурсами та часом, що обмежує швидкість оброблення.

– Аналіз – обмеження: *PoW* та блокчейн-розмір обмежують швидкість. Визначені транзакції призводять до збільшення часу оброблення.

Ethereum

– Швидкість – може обробляти більше транзакцій, приблизно від 15 до 45 TPS. Однак швидкість може змінюватися залежно від обсягу та складності транзакцій.

– Механізм консенсусу – *PoW* (поки що), але планується перехід на *Proof-of-Stake (PoS)*, що може покращити швидкість.

– Аналіз – покращення: планований перехід на *PoS* може підвищити швидкість транзакцій та зменшити витрати енергії. Оптимізації в майбутньому можуть додатково поліпшити продуктивність.

Hyperledger Fabric

– Швидкість – розроблений з огляду на підприємницькі потреби та може обробляти від 1,000 до 4,000 TPS, залежно від конфігурації та оптимізацій.

– Механізм консенсусу – *Pluggable consensus* – можливість вибору між різними алгоритмами консенсусу, що підвищить швидкість.

– Аналіз – підприємницька орієнтованість: швидкість *Hyperledger Fabric* робить його більш придатним для підприємств, де це необхідно.

Унаслідок аналізу можна зробити висновки: *Bitcoin* та *Ethereum* ефективні для різних сценаріїв – від цифрового золота до смарт-контрактів, але обидва мають обмеження швидкості. *Hyperledger Fabric* завдяки своїй великій швидкості та гнучкості виглядає більш привабливим для використання в корпоративних середовищах, де потрібна висока продуктивність і адаптованість до підприємницьких вимог. Результати показали, що *Hyperledger Fabric* виявився найшвидшим у виконанні транзакцій, особливо за умови великого обсягу операцій. *Ethereum* також мав високі показники, тоді як *Bitcoin* демонстрував відносно низьку швидкість. З погляду безпеки й анонімності всі три блокчейн-протоколи мали високий рівень захисту інформації. Однак *Hyperledger Fabric* відрізняється в цьому контексті, забезпечуючи рівень конфіденційності та аутентифікації, що дає змогу контролювати доступ до інформації в мережі. *Ethereum* також виявився досить ефективним у забезпеченні анонімності та безпеки, а *Bitcoin*, як відомо, має свої особливості, зберігаючи відкритий реєстр транзакцій [15].

Важливим фактором була масштабованість систем. У цьому контексті *Hyperledger Fabric* та *Ethereum* продемонстрували високий рівень масштабованості, здатність ефективно обробляти збільшений обсяг транзакцій без втрати продуктивності. *Bitcoin*, з іншого боку, має обмежену масштабованість через свою архітектуру. У контексті реальних сценаріїв використання всі три блокчейн-протоколи виявилися ефективними. Вони успішно виконували фінансові транзакції, управляли смарт-контрактами та інтегрувалися з іншими технологіями. Однак *Hyperledger Fabric* відрізнявся своєю гнучкістю та адаптивністю до різних сценаріїв використання. Захищеність протоколів *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric* відіграє важливу роль у їх успішності та прийнятті у світі криптовалют і блокчейн-технологій. Розглянемо основні аспекти захищеності кожного з цих протоколів [16].

Алгоритм консенсусу *Bitcoin* застосовує *Proof-of-Work (PoW)*, що робить мережу стійкою до атак. *PoW* потребує великої обчислювальної потужності для атак, але наразі існують побоювання щодо централізації майнінгу. Використання криптографічних хеш-функцій (*SHA-256*) для підпису транзакцій та забезпечення безпеки мережі. *Bitcoin* – проект із відкритим кодом, що сприяє виявленню та виправленню потенційних вразливостей спільнотою. Алгоритм консенсусу *Ethereum* використовує *Proof-of-Stake (PoS)* та планує перехід на *Ethereum 2.0*. *PoS* спрямований на зменшення витрат енергії, але його ефективність і безпека ще обговорюються. *Ethereum* дає змогу виконувати смарт-контракти, що може стати причиною вразливостей, і потребує додаткової уваги до безпеки коду. *Ethereum* активно розвивається, але оновлення здатні створювати ризики (наприклад, хардфорки), що потребують уважної реалізації. *Hyperledger Fabric* орієнтований на підприємства. Кожен учасник має визначений рівень доступу, що робить мережу менш вразливою до атак внутрішнього характеру. Застосування системи прав доступу до каналів і смарт-контрактів допомагає контролювати доступ до даних функціональності. *Hyperledger Fabric* дозволяє створювати модульні рішення, а також надає інструменти для забезпечення конфіденційності інформації.

Далі порівняємо механізми консенсусу в *Bitcoin*, *Ethereum* та *Hyperledger Fabric* з погляду їх захищеності. Для *Bitcoin Proof-of-Work (PoW)* має такі переваги, як висока стійкість до атак, особливо до подвійного витрачання, бо для атак необхідна

значна обчислювальна потужність. Недоліками є витрати енергії та екологічні питання, ризик централізації через великі майнінгові пули. Для *Ethereum Proof-of-Stake (PoS)* та планування переходу на *Ethereum 2.0* має такі переваги, як зменшення витрат енергії порівняно з *PoW*, потенційно вища масштабованість та швидкість транзакцій. Недоліками можна назвати питання щодо безпеки, коли йдеться про велику кількість монет, що належать одному учаснику.

Перехід на *Ethereum 2.0* потребує ретельного тестування. Смарт-контракти мають такі переваги: функціональність для їх виконання, можливість створення різноманітних децентралізованих застосунків. Недоліками є ризик вразливостей та багів у коді смарт-контрактів, можливість атак на рівень протоколу через смарт-контракти. Для *Hyperledger Fabric* властиві такі переваги: кожен учасник має визначений рівень доступу, що підвищує захищеність мережі, також можливість створення приватних каналів для конфіденційності. Недоліком є питання щодо децентралізації, оскільки є дозволеною мережею. Щодо системи прав доступу виокремлюємо такі переваги, як гнучка система управління правами доступу, зменшення ризику внутрішніх загроз. Щодо модульності та приватності перевагами є можливість розроблення модульних рішень і забезпечення приватності інформації через конфіденційні канали. Недоліками є складність реалізації та конфігурації модульних рішень.

Тут маємо зробити певні висновки.

Порівняльний аналіз механізмів консенсусу показує, що кожен протокол має свої переваги та недоліки. *Bitcoin* визначається високою стійкістю, *Ethereum* намагається зменшити витрати енергії, а *Hyperledger Fabric* зосереджений на дозволеності та модульності. Важливо зважати на специфіку проекту та його потреби у виборі механізму консенсусу для забезпечення найвищого рівня захищеності. У кожного протоколу є своя особливість, і вибір залежить від конкретних потреб і вимог проекту. Загальний порівняльний аналіз дає змогу краще визначити переваги й недоліки кожного протоколу в контексті захищеності. На загальний висновок впливають різні фактори, зокрема особливість завдань, розмір і характер цифрових активів. *Hyperledger Fabric* виявився більш універсальним і пристосованим до різних потреб, особливо в галузі корпоративного застосування. *Ethereum* і *Bitcoin* також мають переваги, проте їх використання може

бути більш обмеженим залежно від конкретних вимог. Зважаючи на результати експерименту, варто звернутися до пошуку нових можливостей з метою оптимізації та розвитку блокчейн-рішень для захисту цифрових активів. Додаткові дослідження та вдосконалення можуть покращити ефективність та розширити сферу застосування цих технологій. Загалом, результати експерименту дають змогу зробити висновок, що блокчейн-технології є перспективним інструментом для захисту цифрових активів, і вибір певного протоколу має залежати від конкретних потреб і вимог конкретного сценарію використання [17].

Аналіз результатів визначив переваги та недоліки кожного з вивчених блокчейн-рішень. Важливим аспектом є також упровадження стандартів і регулювань для забезпечення взаємодії різних блокчейн-протоколів та відповідності до законодавства.

Переваги та недоліки кожного блокчейн-протоколу

Bitcoin

– Переваги – визначається високою стійкістю до кібератак, але його основний недолік – обмежена швидкість транзакцій, що робить його менш придатним для великого обсягу транзакцій.

– Недоліки – відкритий характер реєстру транзакцій призводить до меншої анонімності.

Ethereum

– Переваги – гнучкість та можливість використання смарт-контрактів. Висока швидкість транзакцій робить його привабливим для різних сценаріїв використання.

– Недоліки – збільшення обсягу транзакцій може призвести до зниження продуктивності, а також є проблеми з приватністю деяких операцій.

Hyperledger Fabric

– Переваги – висока швидкість і конфіденційність роблять *Hyperledger Fabric* ідеальним у корпоративному середовищі. Гнучкість та можливість налаштування дають змогу адаптувати його до різних вимог.

– Недоліки – важкість інтеграції з іншими блокчейн-мережами та можливість впливу обмежень на децентралізацію.

Наголошується на важливості стандартів і регулювань та стандартів взаємодії. Упровадження стандартів для взаємодії різних блокчейн-протоколів

є важливим кроком. Це дозволяє підвищити сумісність та обмін інформацією між різними системами, роблячи їх більш універсальними й ефективними.

У контексті зростання популярності блокчейн-технологій регулювання стає необхідним для забезпечення відповідності до законодавства та забезпечення безпеки. Це може передбачати визначення правил для використання смарт-контрактів, захисту конфіденційності та управління кібербезпекою.

Потреба в адаптації: з огляду на постійний розвиток кіберзагроз і технологічних інновацій блокчейн-рішення мають бути гнучкими та готовими адаптуватися до нових викликів. Удосконалення та оптимізація є ключовими факторами для тривалого успіху. Спрямованість на подальші дослідження та розроблення є важливою для вдосконалення ефективності блокчейн-технологій. Подальші дослідження можуть передбачати розроблення нових протоколів, визначення кращих практик у використанні та регулюванні.

Глобальне співтовариство має взяти на себе відповідальність за розроблення стандартів і регуляцій, сприяючи взаємодії та розвитку блокчейн-технологій у гармонії із сучасними вимогами. Важливо наголосити, що такі технології мають значний потенціал для захисту цифрових активів. Однак їх успіх обумовлений правильним вибором протоколу, створенням стандартів і регулювань, а також готовністю до постійного розвитку та адаптації до змін у кіберпросторі. Глобальне співтовариство, регулятори й технологічні компанії мають співпрацювати для створення безпечного та ефективного цифрового середовища, у якому блокчейн може відігравати ключову роль [18].

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Застосування блокчейн-технологій для захисту цифрових активів є обґрунтованим та ефективним рішенням. Дослідження підтверджує важливість подальших наукових розробок і впровадження стандартів для забезпечення безпеки цифрових активів. Результати аналізу доводять високу ефективність блокчейн-технологій у захисті. Вибір певного блокчейн-протоколу залежить від конкретних вимог і потреб користувача, проте всі розглянуті протоколи (*Bitcoin*, *Ethereum*, *Hyperledger Fabric*) продемонстрували здатність

ефективно захищати цифрові активи та управляти ними. Кожен блокчейн-протокол має свої переваги та недоліки. *Bitcoin* визначається стійкістю та першоджерельністю, але обмеженою швидкістю транзакцій. Для *Ethereum* властива гнучкість та смарт-контракти, але постає питання приватності. *Hyperledger Fabric* вирізняється конфіденційністю та гнучкістю, але може вимагати складніших інтеграцій.

Упровадження стандартів і регулювань є критичним для успішної інтеграції та розвитку блокчейн-технологій. Стандарти взаємодії дають змогу підвищити сумісність різних блокчейн-протоколів і забезпечують їх ефективну спільну роботу. Регулювання важливе для забезпечення відповідності до законодавства та безпеки цифрових активів.

Дослідження наголошує на необхідності подальших наукових розробок. Розвиток нових блокчейн-протоколів, покращення сучасних технологій та визначення кращих практик використання є важливими напрямками наступних досліджень. Активна участь у глобальній науковій спільноті сприятиме еволюції блокчейн-технологій [19].

Глобальне співтовариство відіграє ключову роль у розвитку та впровадженні блокчейн-технологій. Співпраця між державами, підприємствами та науковими установами дає змогу приймати стійкі, безпечні та ефективні блокчейн-рішення [20].

Необхідно зауважити, що цифрові активи, зокрема криптовалюти та токени, стають все більш важливим елементом сучасної фінансової системи. У світі, де цифрова трансформація набуває поширення, захист цих активів стає пріоритетом і має найближчі перспективи, наприклад надійність механізмів консенсусу, оскільки блокчейн використовує різноманітні механізми: *Proof-of-Work (PoW)*, *Proof-of-Stake (PoS)* тощо. Вони забезпечують високий рівень інформації та захищають від подвійного витрачання. Смарт-контракти, що використовують блокчейн, дають змогу автоматизувати виконання угод та управляти активами, що зменшує ризики та підвищує ефективність. Децентралізована природа блокчейну робить його менш вразливим до атак і забезпечує високий рівень захисту від цензури та маніпуляцій.

Необхідно наголосити на можливості використання блокчейну в різних галузях. Зокрема це і фінансовий сектор – упровадження блокчейну в банківські операції може підвищити ефективність та захист від шахрайств. Застосування блокчейну

в ланцюгах постачання сприятиме покращенню відстеження товарів та зменшенню підробки даних. Використання блокчейну для зберігання медичної інформації може гарантувати конфіденційність і недоступність для несанкційного доступу.

Застосування блокчейн-технологій має суттєві виклики та реальні перспективи. Масштабованість – зростання обсягу транзакцій – ставить виклик перед блокчейн-мережами. Розроблення механізмів масштабування – ключовий напрям. Регулювання та легалізація – наближення блокчейн-технологій до масового використання – потребує розроблення ефективних правових механізмів. Екологічні питання – створення енергоефективних механізмів консенсусу для зменшення екологічного впливу.

Загальний висновок

Блокчейн визнаний ефективним інструментом для захисту цифрових активів. Найближчі перспективи полягають у подальшому вдосконаленні механізмів консенсусу, розвитку масштабованості та реагуванні на виклики щодо регулювання. У дослідженні подано комплексний погляд на роль блокчейну в захисті цифрових активів та визначено шляхи розвитку цієї стратегічно важливої сфери. Застосування блокчейн-технологій для захисту цифрових активів є об'єктивно обґрунтованим і практично ефективним рішенням. Успішне впровадження та розвиток цих технологій обумовлені правильним вибором протоколу, створенням стандартів, регулюванням та активною участю глобального співтовариства. Ці фактори наголошують на важливості серйозних досліджень та співпраці для створення безпечного та надійного цифрового майбутнього. Цифрові активи стають суттєвою частиною сучасного фінансового ландшафту, вимагаючи новітніх підходів до їх захисту. Блокчейн-технології – ключовий інструмент у цьому контексті, що пропонує інноваційні рішення для забезпечення безпеки та надійності цифрових активів. Інноваційність блокчейн-технологій у захисті цифрових активів визначає нові можливості для фінансової та технологічної революції. Аналіз наявних рішень та визначення перспектив показують, що сучасні виклики можуть стати стимулом для подальшого розвитку та впровадження інноваційних технологій, які покращать захист цифрових активів і розширять можливості їх застосування.

Список літератури

1. Dwivedi Y. K. et al. Exploring the Darkverse: A Multi-Perspective Analysis of the Negative Societal Impacts of the Metaverse *Information Systems Frontiers*. 2023. Vol. 25. No. 11. P. 2071–2114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-023-10400-x>
2. Hossain M. S. What do we know about cryptocurrency? Past, present, future. *China Finance Review International*. Vol. 11. No. 4. 2021. P. 552–572. DOI: <https://doi.org/10.1108/cfri-03-2020-0026>
3. Gaba S. et al. Holochain: An Agent-Centric Distributed Hash Table Security in Smart IoT Applications *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 81205–81223. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3300220>
4. Ratna S. et al. Digital transformation in tourism and hospitality industry: a literature review of blockchain, financial technology, and knowledge management, *EuroMed Journal of Business*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/emjb-04-2023-0118>
5. Gu X. et al. Review of Privacy Enhancement Methods for Federated Learning in Healthcare Systems, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20. No. 15. Art. 6539 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20156539>
6. W. Du et al. Blockchain technology-based sustainable management research: the status quo and a general framework for future application, *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 39. P. 58648–58663. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21761-2>
7. Shamsuzzoha A., Marttila J., Helo P. Blockchain-enabled traceability system for the sustainable seafood industry. *Technology Analysis and Strategic Management*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2233632>
8. Tereshchenko G., Gruzdo I. Overview and Analysis of Existing Decisions of Determining the Meaning of Text Documents. 2018 *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. 2018. P. 645–653, Art. No. 8632014. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632014>
9. Shubin I., Karataiev O. Reuse of information based on the interpretation of knowledge. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Vol. 2 No. 24. 2023. P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/itsi.2023.24.062>
10. Sharonova N., Kyrychenko I., Tereshchenko G. Application of big data methods in E-learning systems. *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. 2021. (COLINS-2021), 2021. CEUR-WS, Vol. 2870. P. 1302–1311. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/>
11. Kozryiev A., Shubin I. Method of planning data processing tasks in distributed systems with limited information about available resources. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023. No. 3 (25). P. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
12. Joshi P. et al. Blockchain technology for sustainable development: a systematic literature review, *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 683–717. DOI: <https://doi.org/10.1108/jgoss-06-2022-0054>
13. Shinde et al. Securing AI-based healthcare systems using blockchain technology: A state-of-the-art systematic literature review and future research directions, *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2024. Vol. 35. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4884>
14. Rico-Peña J.J., Arguedas-Sanz R., López-Martin C. Models used to characterise blockchain features. *A systematic literature review and bibliometric analysis*. *Technovation*. Vol. 123. 102711 p. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102711>
15. Zhang T., Jia F., Chen L. Blockchain adoption in supply chains: implications for sustainability. *Production Planning and Control*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2296669>
16. Wasiq M. et al. Adoption and Applications of Blockchain Technology in Marketing: A Retrospective Overview and Bibliometric Analysis. *Sustainability (Switzerland)*. 2023. Vol. 15. No. 4. 3279 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043279>
17. Sheela S. et al. Navigating the Future: Blockchain's Impact on Accounting and Auditing Practices, *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 24. Art. no. 16887. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152416887>
18. A. G. Gad et al. Emerging Trends in Blockchain Technology and Applications: A Review and Outlook, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34. No. 9. P. 6719–6742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.007>
19. Plastun A. et al. Persistence in the cryptocurrency market: does size matter? *Investment Management and Financial Innovations*. 2023. Vol. 20. No. 4. P. 138–146. DOI: [https://doi.org/10.21511/imfi.20\(4\).2023.12](https://doi.org/10.21511/imfi.20(4).2023.12)
20. Suslenko V. et al. Use of cryptocurrencies bitcoin and ethereum in the field of e-commerce: case study of Ukraine. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2022. Vol. 1 No. 42. P. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.42.2022.3603>

References

1. Dwivedi, Y. K. et al. (2023), "Exploring the Darkverse: A Multi-Perspective Analysis of the Negative Societal Impacts of the Metaverse", *Information Systems Frontiers*. Vol. 25. No. 11. P. 2071–2114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-023-10400-x>
2. Hossain, M. S. (2021), "What do we know about cryptocurrency? Past, present, future". *China Finance Review International*. Vol. 11. No. 4. P. 552–572. DOI: <https://doi.org/10.1108/cfri-03-2020-0026>
3. Gaba, S. et al. (2023), "Holochain: An Agent-Centric Distributed Hash Table Security in Smart IoT Applications", *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 81205–81223. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3300220>
4. Ratna, S. et al. (2023), "Digital transformation in tourism and hospitality industry: a literature review of blockchain, financial technology, and knowledge management", *EuroMed Journal of Business*. DOI: <https://doi.org/10.1108/emjb-04-2023-0118>
5. Gu, X. et al. (2023), "Review of Privacy Enhancement Methods for Federated Learning in Healthcare Systems", *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Vol. 20. No. 15. Art. 6539 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20156539>
6. Du, W. et al. (2022), "Blockchain technology-based sustainable management research: the status quo and a general framework for future application", *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 39. P. 58648–58663. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21761-2>
7. Shamsuzzoha, A., Marttila, J., Helo, P. (2023), "Blockchain-enabled traceability system for the sustainable seafood industry". *Technology Analysis and Strategic Management*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537325.2023.2233632>
8. Tereshchenko, G., Gruzdo, I. (2018), "Overview and Analysis of Existing Decisions of Determining the Meaning of Text Documents". *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. P. 645–653, Art. No. 8632014. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632014>
9. Shubin, I., Karataiev, O. (2023), "Reuse of information based on the interpretation of knowledge". *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Vol. 2 No. 24. P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
10. Sharonova, N., Kyrtychenko, I., Tereshchenko, G. (2021), "Application of big data methods in E-learning systems". *5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. 2021. (COLINS-2021), CEUR-WS. Vol. 2870. P. 1302–1311. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2870/>
11. Kozyriev, A., Shubin, I. (2023), "Method of planning data processing tasks in distributed systems with limited information about available resources". *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. No. 3 (25). P. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.027>
12. Joshi, P. et al. (2023), "Blockchain technology for sustainable development: a systematic literature review", *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*. Vol. 16. No. 3. P. 683–717. DOI: <https://doi.org/10.1108/jgoss-06-2022-0054>
13. Shinde, et al. (2024), "Securing AI-based healthcare systems using blockchain technology: A state-of-the-art systematic literature review and future research directions", *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. Vol. 35. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.4884>
14. Rico-Peña, J.J., Arguedas-Sanz, R., López-Martin, C. (2023), "Models used to characterise blockchain features". *A systematic literature review and bibliometric analysis. Technovation*. Vol. 123. 102711 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102711>
15. Zhang, T., Jia, F., Chen, L. (2024), "Blockchain adoption in supply chains: implications for sustainability". *Production Planning and Control*. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2296669>
16. Wasiq, M. et al. (2023), "Adoption and Applications of Blockchain Technology in Marketing: A Retrospective Overview and Bibliometric Analysis". *Sustainability (Switzerland)*. Vol. 15. No. 4. 3279 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043279>
17. Sheela, S. et al. (2023), "Navigating the Future: Blockchain's Impact on Accounting and Auditing Practices", *Sustainability*. Vol. 15. No. 24. Art. no. 16887. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152416887>
18. Gad, A. G. et al. (2022), "Emerging Trends in Blockchain Technology and Applications: A Review and Outlook", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. Vol. 34. No. 9. P. 6719–6742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.007>
19. Plastun, A. et al. (2023), "Persistence in the cryptocurrency market: does size matter?", *Investment Management and Financial Innovations*. Vol. 20. No. 4. P. 138–146. DOI: [https://doi.org/10.21511/imfi.20\(4\).2023.12](https://doi.org/10.21511/imfi.20(4).2023.12)
20. Suslenko, V. et al. (2022), "Use of cryptocurrencies bitcoin and ethereum in the field of e-commerce: case study of Ukraine". *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. Vol. 1 No. 42. P. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.42.2022.3603>

Відомості про авторів / About the Authors

Терещенко Гліб Юрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: hlib.tereshchenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8731-2135>

Кириченко Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; e-mail: iryna.kyrychenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7686-6439>

Tereshchenko Glib – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kyrychenko Iryna – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ANALYSIS AND JUSTIFICATION OF THE USE OF EXISTING BLOCKCHAIN SOLUTIONS FOR THE PROTECTION OF DIGITAL ASSETS

The **subject** of this article is consideration of modern blockchain solutions and their potential use in the context of digital asset protection. Various aspects of blockchain technology are explored, including consensus mechanisms, security levels, and functionality. The **goal** of the work is a systematic analysis and justification of the application of various blockchain solutions for the protection of digital assets. The article is aimed at determining the effectiveness and feasibility of using specific blockchain protocols and their functional elements to ensure the safety, reliability, and integrity of digital assets. The following **tasks** were solved in the article: consideration of modern blockchain technologies and consideration of their role in ensuring the security of digital assets. Conducting a detailed analysis of popular blockchain protocols, including Bitcoin, Ethereum, and Hyperledger Fabric, with a focus on their security against various types of cyber threats and attacks. The following **methods** are used: analysis of blockchain protocols, expert evaluations of the effectiveness of protection of digital assets, and study of the technical features of each solution. The following **results** were obtained: clearly defined advantages and disadvantages of each protocol were obtained, taking into account their applicability in the field of digital assets in various fields of application, such as semantic analysis of texts, E-Learning, Big Data, DDP-systems, finance, etc. In addition, the issue of network privacy in the context of information protection was investigated and justifies the choice of the optimal blockchain solution for a specific use. **Conclusions:** The article provides readers with an overview of how to effectively use blockchain to ensure the reliability and security of digital assets in a variety of usage scenarios. In today's digital world, where the value of digital assets is growing exponentially, protecting them from cyber threats becomes a critical task. Blockchain technologies, originally developed for cryptocurrencies, have gained recognition as an effective tool in the field of cyber security. The importance of standardization and regulation in the field of blockchain technologies to ensure their effective integration and compliance with the requirements of the law is put forward.

Keywords: blockchain; cyber security; digital assets; anonymity; confidentiality; speed of transactions; standardization; regulation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Терещенко Г. Ю., Кириченко І. В. Аналіз і обґрунтування використання наявних блокчейн-рішень для захисту цифрових активів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 164–178. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.164>

Tereshchenko, G., Kyrychenko, I. (2024), "Analysis and justification of the use of existing blockchain solutions for the protection of digital assets", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 164–178. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.164>

О. ФЕДОРОВИЧ, Л. МАЛЕСЬВ

ОНТОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ КОМПОНЕНТ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИРОБІВ У ПРОЕКТАХ ЇХ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Предметом роботи є моделі подання структури та параметрів компонент високотехнологічних виробів на основі аналізу технічної документації в прецедентах їх модернізації. **Мета** пропонованого дослідження – підвищити якість процесів модернізації високотехнологічних виробів з допомогою формування онтологічної моделі виробу з інноваційними компонентами з огляду на різноманітність інформаційного забезпечення. У статті вирішуються такі **завдання**: дослідження основних методів і технологій системного подання структури складного виробу; формування моделі структурно-функціональної декомпозиції високотехнологічного виробу; створення онтологічної моделі структури та параметрів високотехнологічного виробу на основі інформації технічної документації. Застосовуються **методи**: системний підхід, функціонально-структурна декомпозиція, теорія множин, побудова онтологій, семантичні моделі. **Досягнуті результати**. Досліджено основні методи системного подання структури складного виробу, що базуються на таких принципах: декомпозиція архітектури складного виробу, стратифікація подання складного виробу, багатоваріантність синтезу компонентної архітектури. Розглянуто основні напрями та переваги застосування 3D-технологій для вирішення завдань проєктування конструкцій у проєктах модернізації компонент високотехнологічних виробів. Запропоновано декомпозицію високотехнологічного виробу на компоненти та часткові параметри з огляду на функціональні, структурні та параметричні характеристики. Сформовано онтологічну модель структури та параметрів високотехнологічного виробу на основі комплексу технічної документації та зважаючи на додаткові різноманітні джерела інформації. Виокремлено інноваційні елементи, опис яких може бути нечітким. **Висновки**. Запропонована онтологічна модель може бути основою для пошуку близьких рішень щодо конструкції інноваційних компонент у базі прецедентів, яка структурована відповідним чином. У разі відсутності близьких рішень проєктування інноваційних компонент може бути здійснено із застосуванням 3D-технологій на основі доповнення нечіткої інформації семантичної моделі.

Ключові слова: проєкти модернізації; високотехнологічні вироби; компоненти; декомпозиція; моделювання конструкції; технічна документація; структура; параметри; онтологія; семантична мережа.

Вступ

Основним напрямом розвитку високотехнологічного виробництва є проєкти модернізації складної техніки, що дає змогу забезпечити відповідність її функціональних можливостей сучасним вимогам застосування та бути конкурентоспроможною. В сучасних умовах повномасштабного вторгнення також важливим стає ремонт і відновлення пошкодженої складної техніки, зокрема закордонного виробництва.

Сучасний рівень створюваних високотехнологічних виробів (ВТВ) вимагає пошуку ефективних методів аналізу та управління проєктами за їх модернізацією [1–3], які визначаються:

- інноваційністю змісту проєктів;
- багатокомпонентним складом, багаторівневою деталізацією технічної системи;
- значними обсягами проєктної інформації;
- специфікою процесів постачання комплектування для модернізації виробів.

Аналіз результатів виконання проєктів часткової модернізації складної техніки показує, що їх реалізація

супроводжувалася перевищенням запланованих термінів, фінансових ресурсів і, в окремому випадку, недосягненням передбачуваного підвищення або відновлення функціональної якості техніки. Також складним є питання визначення та постачання необхідних комплектів для ремонту та модернізації складної техніки, особливо тоді, коли відновленню підлягає техніка закордонного виробництва.

Тому в статті розглядається актуальне завдання формування моделі структури складного виробу, що підлягає модернізації або відновленню на основі системного та компонентного підходів. Це дасть змогу виділити інноваційний складник високотехнологічних виробів і спланувати заходи з її проєктування та подальшого виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завдання моделювання та синтезу структури складних виробів у проєктах їх модернізації розглядалися в різних аспектах.

Для моделювання ієрархічної структури складного об'єкта застосовується структурно-функціональний підхід. У цьому разі формується дві ієрархічні моделі – структури та властивостей [4]. Особливістю подання є розкриття механізму взаємодії вказаних моделей. Взаємодія забезпечується з допомогою процесу функціонування, у якому складники структури виконують необхідні перетворення, а результатом функціонування є отримані властивості. Ієрархія конкретних властивостей формує комплект властивостей, який забезпечує реалізацію призначення об'єкта.

Для вирішення завдання формування раціонального варіанта модернізації складного виробу в роботі [5] застосовано методико-алгоритмічний апарат багатокритерійного вибору з метою модернізації бойових тактичних літаків на основі комплексного оцінювання показників військово-технічного рівня, реалізованості, вартості та часу. Виконано завдання визначення компромісного раціонального варіанта з області паретооптимальних. Водночас вироблялось порівняння майбутнього варіанта з "ідеальним" у нормованому критерійному просторі за формулою евклідової метрики.

Принципи інтеграції в проектуванні складних виробів реалізовано в методології структурно-параметричного моделювання, який полягає не тільки в поєднанні етапів життєвого циклу, а й у застосуванні відповідних засобів геометричного моделювання у вигляді належного математичного апарату. Розглянуто основні положення способу зменшення сфери проектних рішень [6]. В автоматизованих системах проектування вдосконалено технології *CALS* для забезпечення зв'язку етапів побудови 3D-моделей об'єкта складної техніки на основі знання-орієнтованих технологій протягом циклу їх створення та обміну інформацією між різними компонентами *CALS* [7].

Проводилися дослідження щодо розроблення методів декомпозиції та класифікації елементів складної системи. Так, у роботі [8] приділено увагу питанням функціональної декомпозиції складної системи. На основі опрацювання потоків даних різної інформаційної значущості виявлено характерні ознаки поведінки системи щодо цілі. У працях [9, 10] подано алгоритми декомпозиції частин складної системи та секвенування її адитивних і субтрактивних ознак за допомогою методів штучного інтелекту та машинного навчання.

Нейронні мережі також використовувалися з метою класифікації об'єктів способом глибокого

контекстно-адаптивного двійкового арифметичного кодування (*DeepSABAC*) як ядро технології кодування та декодування інформації, а також як методи попереднього оброблення параметрів, такі як розрідження, скорочення, розкладання низького рангу, уніфікація, локальне масштабування [11]. У дослідженні [12] запропоновано гібридну модель, що об'єднує теорію приблизних множин з алгоритмами дерев рішень, тим самим вирішуючи вроджені обмеження цих алгоритмів у роботі з невизначеністю в даних. Ця інтеграція має суттєво покращити точність та ефективність бінарної класифікації на основі дерев рішень, роблячи їх більш стійкими до різної вхідної інформації.

Онтологічний підхід до проектування будь-яких класів складних систем дає змогу провести чітку та ієрархічну декомпозицію процесів проектування будь-якої системи заданого призначення. У роботі [13] запропоновано онтологічну модель знань архітектури кібернетичної організаційної системи, що поєднує в собі технологічні, організаційні та проектні концепти.

В останні роки з'явилася низка перспективних розробок щодо використання онтологій у промисловості. Водночас, однак, більшість робіт із розроблення промислових онтологій залишаються у сфері академічних досліджень і не мають значного практичного застосування. Існує набір принципів, запропонованих *Open Biomedical Ontologies (OBO Foundry)*, щоб керувати проектуванням і розробкою *Industrial Ontologies Foundry (IOF)*, яка є аналогом ініціативи *OBO Foundry* для промисловості [14, 15]. У праці [16] уможлиблюється кількісне оцінювання якості концептуалізованих онтологій на основі дерева *NFR* та пов'язаних із ним метрики та показників.

Мета й завдання роботи

З проведеного огляду можна зробити висновки, що перспективними напрямками моделювання структури ВТВ у проектах їх модернізації є системна декомпозиція із застосуванням формалізованих моделей знань предметної галузі. Однак нерозв'язаними питаннями є формування онтологічних моделей для опису та класифікації інноваційних елементів компонентної структури складної техніки.

Отже, метою запропонованого дослідження є підвищення якості процесів модернізації ВТВ шляхом формування онтологічної моделі виробу

з інноваційними компонентами з огляду на різноманітність інформаційного забезпечення. У статті вирішуються такі завдання:

- 1) дослідження основних методів і технологій системного подання структури складного виробу;
- 2) формування моделі декомпозиції ВТВ на основі компонентного підходу;
- 3) створення онтологічної моделі структури ВТВ із виділенням інноваційних компонент.

Матеріали та методи

У процесі створення та модернізації ВТВ широко впроваджуються методи системного аналізу. Як відомо, архітектура складного виробу є множиною ієрархічно пов'язаних між собою підсистем, агрегатів, блоків, вмонтованих в окремі елементи, що описується багаторівневою структурою. У дослідженні таких структур застосовують деякі принципи.

1. *Декомпозиція архітектури складного виробу.* Архітектура складного виробу описується за допомогою ієрархічного багаторівневого подання. Повністю цей процес не формалізований, тому часто використовуються евристичні прийоми для опису структури складного виробу, які ґрунтуються на досвіді та інтуїції розробників. Нині існують інструменти моделювання, що дають змогу будувати ієрархічні структури та досліджувати зв'язки компонентів.

Для класифікації компонентів та оцінювання ступеня складності їх подальшої композиції з іноваційними елементами необхідно проводити декомпозицію, вибір компонентів із множини можливих, оцінювання та оптимізацію структури складної системи, до того ж на багатокритеріальній основі [5]. Отже, з огляду на багаторівневість декомпозиції, багатозв'язність окремих компонентів для кожної з підсистем необхідне можливе формування критеріїв, що дасть змогу зробити багатокритеріальний вибір оптимального рішення з модернізації складної техніки.

2. *Стратифікація подання складного виробу.* Стратифікація передбачає подання ВТВ як складної системи в багатьох аспектах. Застосовуються такі страти подання: цільова, функціональна, математична, інформаційна, алгоритмічна страта та страти технічних і програмних засобів. Опис ВТВ на кожній страті зазвичай поданий у технічній документації на створення або експлуатацію складної системи.

Значимо, що для розв'язання задачі компонентного синтезу складного виробу важливими є функціональна страта й технічна. Саме на цій страті розглядаються функціональні та технічні вимоги (кількісні характеристики) до певних, зокрема інноваційних, компонент ВТВ. За цими вимогами здійснюється пошук окремих компонентів для їх модернізації.

3. *Багатоваріантність синтезу компонентної архітектури.* У процесі модифікації складного виробу проєктувальники стикаються з множиною варіантів. Що більше розглядається варіантів, то вища ймовірність отримання оптимального (раціонального) рішення з мінімальним ризиком комплексування [3]. Вибір найкращого варіанта (варіантів) із множини можливих здійснюється на основі методів теорії прецедентів для досягнення максимальної схожості компонент. У цьому разі оцінка схожості може бути отримана із застосуванням теорії нечітких множин [17]. Перспективним напрямом є використання нейронних мереж для оцінювання схожості за значною кількістю ознак.

Сучасні технології в машинобудуванні зумовили застосування 3D-друку в розробленні нових деталей і механізмів, а також і для вирішення таких завдань:

- модернізація наявних систем і окремих елементів;
 - ремонт і заміна деталей, що вийшли з ладу.
- У машинобудівній галузі використання 3D-друку має такі переваги:
- можливість виготовлення інноваційних, геометрично унікальних деталей;
 - скорочення термінів виробництва;
 - зменшення помилок шляхом усунення людського фактора;
 - поліпшення технічних параметрів виробів: зниження ваги, підвищення точності та міцності;
 - можливість поліпшувати фізико-механічні властивості деталей.

Використання 3D-друку в модернізації та заміні окремих елементів ВТВ допомагає вирішувати проєктні завдання дешевше та швидше. Наприклад, в *UTC Aerospace* виготовили нову модернізовану версію сопла витяжної системи зі спеціального міцного та жаростійкого інженерного пластику [18]. Це нововведення не тільки поліпшило якість деталі, але й значно скоротило терміни виробництва та собівартість.

У військовій та оборонній промисловості застосовують технології 3D-друку для покращення продуктивності та безпеки завдяки таким перевагам:

- створення нестандартних деталей на вимогу, у ситуаціях, коли стандартні запчастини недоступні;
- виготовлення легких і високоміцних деталей, що зменшує загальну вагу обладнання та підвищує його надійність;
- вирішення логістичних проблем завдяки уникненню довгих ланцюгів постачання, що підвищує операційну гнучкість виробництва.

Таким чином розширені можливості 3D-друку можуть підвищити ефективність проєктів модернізації та відновлення ВТВ на виробничих підприємствах як загального машинобудування, так і військової та оборонної галузей.

Зазвичай вихідними показниками для створення нових виробів є технічне завдання, яке надає замовник. Але необхідно зазначити, що на першому етапі 3D-моделювання інноваційних виробів збирається інформація різного типу: ескізи, креслення, фотографії та відеоролики, малюнки, часто навіть використовують готовий зразок виробу-аналога (або пошкоджений зразок деталі в проєктах відновлення техніки). На основі отриманої інформації створюється тривимірна модель у 3D-редакторі або CAD-програмі.

Якість друкованої деталі суттєво залежить від її цифрової моделі, що використовується для друку. Тому дуже важливу роль відіграє якість

моделювання тривимірної деталі перед друком. Незважаючи на наявність високотехнологічних CAD/CAM/CAE-систем, проблема первісного визначення структурних елементів моделей інноваційних виробів наразі залишається не повністю вирішеною. Це зумовлено зростанням складності моделей ВТВ.

Результати дослідження

Відповідно до принципу стратифікованого уявлення складної системи запропоновано декомпозицію ВТВ на компоненти та часткові параметри з огляду на функціональні, структурні та параметричні характеристики. Унаслідок відображено властивості компонентів, що модифікуються. Це дає змогу згодом шукати релевантні прецеденти (вироби-аналоги) на низьких рівнях декомпозиції та знаходити прецеденти з високим рівнем схожості інноваційних компонентів. Першим рівнем декомпозиції є розбиття складного виробу на багатофункціональні блоки (модулі). Потім здійснюється декомпозиція на окремі структурні елементи конструкції виробу. На нижньому рівні виконується розбиття на компоненти, що визначаються інноваційними характеристиками та мають певні геометричні параметри.

На рис. 1 зображено структурно-функціональне подання ВТВ у вигляді декомпозиції на множини підсистем і елементів. Кожній структурній одиниці відповідає функція, яку вона виконує в системі.

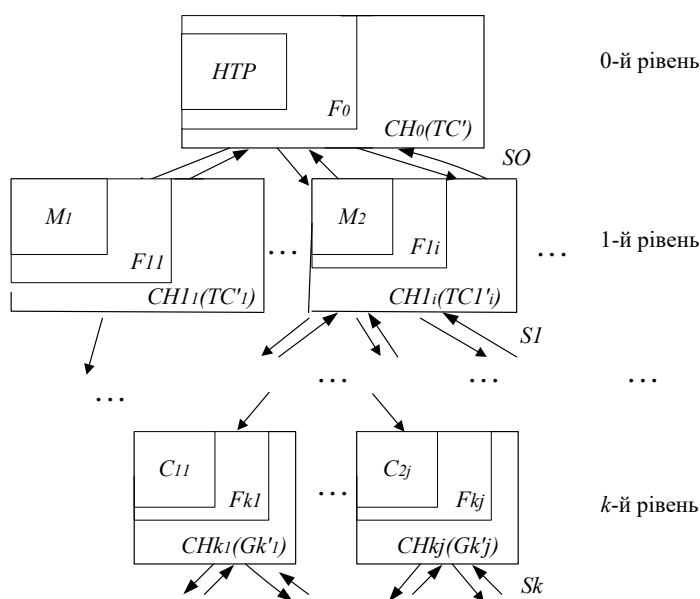


Рис. 1. Структурно-функціональне подання ВТВ

На рисунку прийняті такі позначки: *НТР* – високотехнологічний виріб (*high-tech product*); M_i – i -й модуль (комплекс, підсистема); C_j – j -й компонент (елементи нижніх рівнів структури); F_0, F_{1i}, F_{kj} – функціональне призначення відповідних елементів структури ВТВ; CH_0, CH_{1i}, CH_{kj} – характеристики відповідних елементів структури, зокрема технічні; для компонент нижнього рівня декомпозиції (деталі) вказано $G_{k'1}, G_{k'j}$ – геометричні параметри. Унаслідок аналізу взаємозв'язків характеристик (зокрема геометричних параметрів) елементів нижнього рівня можуть бути змінені характеристики елемента, що породжує. У цьому разі використовується S_k – оператор комплексування характеристик верхнього рівня на основі множини характеристик елементів нижнього рівня:

$$CH_{k'} \rightarrow S_k \{CH_{k-1}\}.$$

У зв'язку з інноваційністю ВТВ, що модифікуються, та відповідною складністю моделювання, суттєво зростає обсяг та складність геометричних моделей конструкції, систем та обладнання для виробництва й модернізації ВТВ. Реальні характеристики, утворені після комплексування, не завжди збігаються із запланованими. Виникає ризик комплексування, що впливає на можливість виконання заданих функцій елементами ВТВ.

У сучасних *PLM*-системах реалізовано послідовну деталізацію під час проектування ВТВ у *CAD/CAM/CAE*-системах, що потребує потім системного компонентного синтезу [19]. Декомпозиція та синтез інформації забезпечуються універсальними алгоритмами, які реалізовані в системі проектування та спираються на інформацію у базах даних. Подібний підхід не дає змогу застосувати стандартні процедури для інноваційних компонентів ВТВ.

Використання онтологічного підходу полегшує процес створення моделі складного виробу та допомагає узгодити паралельну й послідовну роботу фахівців над проектом його модернізації.

Основні перевагами застосування онтології виробу, що модернізується:

1) ефективне компактне подання системи знань предметної галузі на базі сучасних інформаційних технологій, що дає змогу описати концепцію модернізації та специфікації ВТВ;

2) пошук інформації в системі знань отриманої онтології, що допомагає використовувати інформацію щодо прецедентних рішень;

3) розвиток системи та отримання нових знань або впорядкування наявних, перевірка їх несуперечності, корекція ієрархічної структури ВТВ.

Розроблення геометричної моделі компонент ВТВ із використанням інформаційних технологій є процесом [20], що містить кілька етапів:

– складання технічного завдання та технічної пропозиції;

– попереднє (ескізне) проектування – формування моделі майстер-геометрії ВТВ та моделі розподілу об'єктів;

– робоче проектування – формування моделі повного визначення виробу.

Документація, створювана на ранніх стадіях розроблення або модифікації виробів, містить інформацію, на основі якої можна сформувати базу множини аналогічних розробок. Ескізний проєкт, порівняно з технічним, більш повно подає конструкцію виробу. Детальна інформація, зафіксована за всіма елементами конструкції, міститься тільки в робочій документації. Як технічне завдання, так і ескізний проєкт містять текстову, графічну та кількісну (технічні характеристики) інформацію [21]. Крім того, більшість інформації в документах є взаємозв'язаною: одна інформація уточнює іншу або є її частиною. Тому для структуризації інформації про складні вироби, що модифікуються, ефективним є застосування онтологічних моделей у вигляді семантичних мереж.

Проектування онтології передбачає первинне визначення її предметної галузі, термінів і класів, масштабів і меж, організацію ієрархії термінів, формування атрибутів і термінів властивостей, їх значень. Побудована онтологічна модель максимально повно й достовірно відтворить ключові аспекти розглянутої предметної галузі – об'єкти функціональної, структурної та параметричної декомпозиції складного виробу, використовуючи стандартні елементи метамоделей: класи, атрибути, відношення тощо.

На формальному рівні онтологія – це система, що складається з набору понять і тверджень про ці поняття, на основі яких можна будувати класи, об'єкти, відношення, функції та теорії. Моделі онтології містять певні концепти (поняття, класи), властивості концептів (атрибути, ролі), відношення між концептами (залежності, функції) та додаткові обмеження, що визначаються аксіомами.

Онтологічні системи побудовані на основі таких принципів:

- формалізація – опис об'єктивних елементів предметної галузі в єдиних, чітко визначених зразках (термінах, моделях тощо);

- використання обмеженої кількості базових термінів (сутностей), на основі яких будуються всі інші поняття;

- внутрішня повнота й логічна несуперечність.

Формальна модель онтології – це упорядкована трійка кінцевих множин

$$O = \langle T, R, F \rangle ,$$

де T – терміни предметної галузі, яку описує онтологія O ; R – відношення між термінами заданої предметної галузі; F – функції інтерпретації, задані на термінах та/або відношеннях онтології O .

Моделі онтологій класифікуються таким чином:

- прості – мають лише концепти;

- на основі фреймів – мають концепти та властивості;

- на основі логік – мають концепти, властивості та відношення.

Відношення є типом взаємодії між концептами предметної галузі. Відношення, які доцільно використовувати в процесі створення онтології, менш різноманітні, ніж терміни, і, як правило, не специфічні для конкретної предметної галузі ("частина-ціле", "є підкласом", "впливає", "схоже" тощо).

Для формалізованого опису об'єктів розроблення вихідна інформація подається як багаторівнева фреймова структура, абстрактна модель предметної галузі – як організована сукупність множини понять, а конкретна модель ситуації – як сукупність взаємозалежних екземплярів цих понять.

Загальний принцип уявлення вихідного об'єкта опису полягає в тому, що він складається з множини елементів. Для подання об'єкта опису необхідно:

- визначити об'єкти понять;
- описати властивості об'єктів понять;
- описати елементи об'єктів.

Визначення об'єктів понять потрібне, коли в об'єкті опису подано два або більше однотипних понять (наприклад, однакові деталі). Якщо потрібно схарактеризувати об'єкти понять, то їм вказуються значення атрибутів.

Кожен елемент можна описати у вигляді об'єкта, що складається з центрального поняття, контексту та другорядних понять.

Склад фреймового опису вихідного об'єкта виглядає так:

об'єкт:

група-елементів |

оголошення-понять група-елементів |

оголошення-понять властивості-понять група-елементів.

Множина елементів описується так:

елемент:

центральне-поняття |

центральне-поняття контекст |

центральне-поняття контекст другорядне-поняття.

У ролі поняття може бути як узагальнене, так і конкретне поняття з предметної галузі:

поняття:

об'єкт-поняття |

клас-поняття.

Ідентифікатор є засобом іменування понять:

ідентифікатор:

літера |

ідентифікатор |

ідентифікатор цифра.

Секція властивостей визначає атрибути понять, оголошених раніше:

властивості-понять:

група-атрибутів:

атрибут |

група-атрибутів атрибут

атрибут:

об'єкт-поняття |

ім'я-атрибути |

значення-атрибути

ідентифікатор

значення-атрибути:

літера | цифра | символ

значення-атрибути буква |

значення-атрибути цифра |

значення-атрибути символ.

Для побудови семантичної мережі необхідно опрацювати поданий у вигляді тексту (з чисельними значеннями) опис документа та класифікувати елементи за категоріями понять.

Виявлення понять для опису об'єкта починається з виділення центрального поняття, потім понять, що відображають їх асоціації, та другорядних понять. Отримавши перелік центральних понять, потрібно перейти до пошуку зв'язків отриманих понять з іншими поняттями. Знаючи про наявність таких

зв'язків і діючи подібно до пошуку центральних понять, можна виявити контекст цих понять. Отже, розглядаючи уявлення предметної галузі та визначивши центральне поняття предметної галузі та його взаємозв'язок з іншими елементами моделі, можна класифікувати отримані зв'язки за відповідними категоріями.

Отриманий таким чином опис об'єкта розроблення / модифікації складатиметься з множини елементів, що описують загальний стан предметної галузі без властивостей понять, що відтворюють сутності та відношення. Цього опису вже буде достатньо для пошуку описів аналогічних розробок, схожих за структурою (або геометрією). Отримавши значення атрибутів для понять предметної галузі, результати пошуку можна наблизити до найбільш відповідного результату. Для цього необхідно провести пошук кандидатів у поняття.

Під час пошуку кандидатів у поняття можна керуватися класичним способом, тобто розглядати стандартні категорії об'єктів та намагатися виділити з отриманого опису поняття, які могли б належати цим категоріям. Для цього можна скористатися описами груп категорій і самих категорій.

Описуючи об'єкт S , отримуємо дві множини кандидатів: SE – множину понять, що є сутностями, і SR – множину понять, що виражають відношення між іншими поняттями.

Першим кроком є виділення кандидатів із множини центральних понять – SC . Потім пошук центральних понять здійснюється серед інших елементів множини кандидатів SE . Для виділення центральних понять необхідно використовувати такі рекомендації:

- центральне поняття узагальнює його складники;
- центральне поняття розташовано на вищому рівні ієрархічної структури;
- відокремлене центральне поняття може не мати зв'язків із іншими поняттями предметної галузі, але бути невід'ємною частиною опису ситуації. У разі вилучення цього поняття опис втрачає повноту.

Наступним кроком буде виділення отриманих кандидатів у центральні поняття, а потім – виділення контексту. Для цього спочатку з множини кандидатів SE вилучаються елементи множини центральних понять SC , унаслідок чого отримаємо множини асоціацій (відношень і другорядних понять):

$$SA = SE \setminus SC .$$

Завдання полягає у виділенні підмножини відношень із множини асоціацій:

$$SR \subset SA .$$

Асоціація центрального поняття з іншими поняттями може виражати такі типи активних зв'язків між ними:

- залежність;
- підпорядкованість;
- відношення агрегування ("ціле – частина").

Отже, керуючись списком типів активних і додаткових зв'язків, отримаємо елементи множини відношень SR . Кожен із елементів множини відношень R_{c_i} буде пов'язаний із певним центральним поняттям c_i , формуючи множину описів елементів

$$s_i = \langle c_i, R_{c_i} \rangle, R_{c_i} \in SR \quad c_i \in SC .$$

На цьому етапі отримані описи елементів поки не є повними, оскільки елементи множини SR ще не поставлені у відповідність до другорядних понять. Другорядними поняттями можуть бути будь-які елементи множини кандидатів SE , незалежно від того, чи потрапили вони в множину центральних понять SC , множину відношень SR або в жодне з них. Другорядними є поняття, куди посилаються асоціації. В описі компонент ВТВ це можуть бути їх властивості.

Отже, для побудови онтологічної моделі ВТВ на основі документів із комплексу технічної документації та зважаючи на додаткові джерела інформації необхідно виконати такі дії:

- проаналізувати зміст документа з метою виділення основних елементів семантичної мережі;
- визначити види елементів, типи їх можливих значень;
- сформувати структуру – виділити рівні ієрархії елементів, утворити зв'язки, вказати їх спрямованість;
- визначити види об'єктів – елементів семантичної мережі;
- визначити семантичні типи вузлів, вказати їх атрибути;
- вказати види зв'язків (їх атрибути).

Значимо, якщо для створення моделі майстер-геометрії компонента ВТВ використовується різноманітна інформація, наприклад зображення або документація, що не є повною або не відповідає стандартним вимогам, то деякі атрибути можуть бути вказані нечітко – лінгвістичними чи інтервальними кількісними значеннями. Відповідна властивість має бути відтворена в онтологічній моделі. Наприклад, для відображення інтервальних значень у редакторі

онтологій *Protégé* можна використовувати атрибути із значеннями "максимальне" та "мінімальне" [22].

Як було зазначено вище, геометричні та технічні параметри складного виробу відтворюються в ескізному проекті. Сформуємо опис об'єктів (елементів) ескізного проекту із зазначенням

їх властивостей (табл. 1) та умовних позначок елементів семантичної мережі.

На основі аналізу елементів мережі та їх взаємозв'язків розроблено ієрархічну структуру онтології компонента ВТВ, що зображена на рис. 2.

Таблиця 1. Елементи онтології ескізного проекту

Документи	Розділи	Вид елемента	Тип значення
Кресленики загального вигляду (O1)	Зображення виробу (O1.1)	одиночний	рисунок
	Найменування та позначки складників виробу (O1.2)	група елементів з атрибутами (O1.2.a)	текстові та символічні
	Розміри та інші показники, що наносяться на зображення (O1.3)	група елементів	числові та символічні (можливо текстові)
	Схема (O1.4)	одиночний	рисунок
	Технічні характеристики виробу (O1.5)	група елементів з атрибутами (O1.5.a)	текстові та числові
Відомість (O2)		група елементів	текстові
Пояснювальна записка (O3)	Призначення та сфера застосування виробу, що розробляється (O3.1)	одиночний	текстовий
	Технічні вимоги (O3.2)	група елементів з атрибутами (O3.2.a)	текстові (можливо числові)
	Опис конструкції (O3.3)	одиночний	текстовий
	Розрахунки працездатності та надійності конструкції (O3.4)	група елементів з атрибутами (O3.4.a)	числові та текстові
	Рівень стандартизації та уніфікації (O3.5)	група елементів	текстові та числові

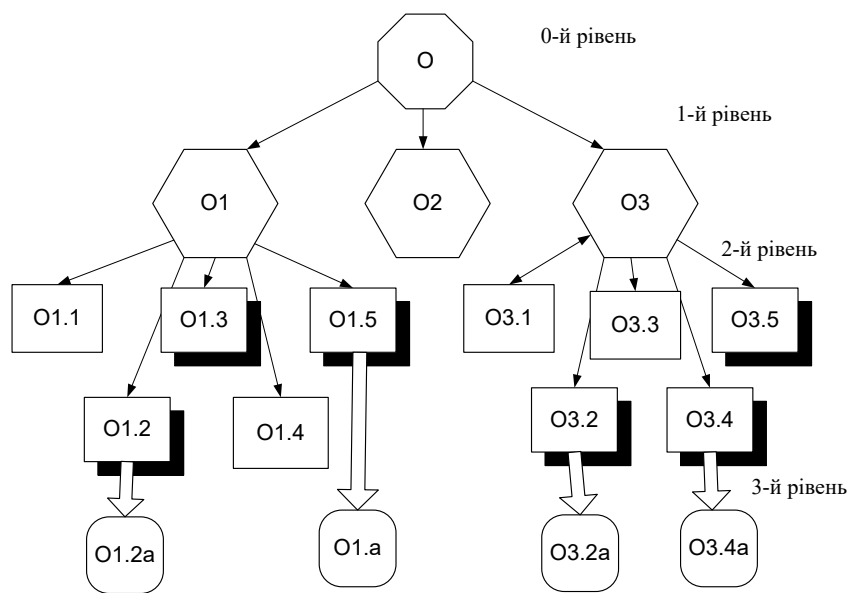


Рис. 2. Ієрархічна структура онтології компонента ВТВ

Для розроблення онтологічної моделі опису об'єктів КВТВ необхідно визначити категорії понять та види зв'язків [23].

Вузли та зв'язки мають набір таких основних атрибутів:

- *ObjectType* – вид об'єкта, що відповідає вузлу;
- *SemanticType* – семантичний розряд референта

вузла;

- *Name* – рядок тексту, що відповідає вузлу;
- *Relation* – тип синтактико-семантичного зв'язку між вузлами.

У запропонованій моделі виокремлено такі види об'єктів:

- центральні поняття (кресленик загального вигляду, відомість, пояснювальна записка)

ObectType = "Centr"[O1, O2, O3];

– контекст (зображення виробу, схема, призначення та сфера застосування, опис конструкції)

$ObectType = "Context"[O1.1, O1.4, O3.1, O3.3];$

– група понять (найменування та позначки складників, розміри, технічні характеристики, розрахунки надійності, рівень стандартизації та відповідні значення)

$ObectType = "Group"[O1.2, O1.3, O1.5, O3.1, O3.4, O3.5].$

В описі елементів були введені такі семантичні типи (*SemanticType*):

1) найменування (*Name*) – ці елементи є текстовими, тобто суто інформаційними характеристиками об'єкта модифікації;

2) властивість (*Qva*) – ці елементи є характеризуючими, вони описують властивості об'єкта (наприклад, окремі елементи технічних вимог). Призначення та технічні вимоги є основними елементами пошуку аналогічних інноваційних компонент;

3) число (*Num*), стан (*State*) – значення окремих технічних характеристик найчастіше є числовими та текстовими значеннями, що декомпозиуються. Саме числові значення можуть бути нечіткими, тобто задані у вигляді інтервалів; це буде окремий тип (*NumR*);

4) предмет (*Item*) – описують елементи об'єкта, що модифікується, також зазвичай не декомпозиуються.

Визначимо типи зв'язків, що використовуються для побудови семантичної мережі (*Relation*).

1. Атрибут (*Atr*) – найчастіше присутній у семантичної мережі тип зв'язку. У цьому разі об'єкт нижнього рівня ієрархії є атрибутом (уточнювальним поняттям, що розкриває сутність) об'єкта верхнього рівня. Для пошуку аналогічних компонент більш суттєвими є атрибути, а не самі поняття.

2. Залежність (*Corr*) – виражає залежність між об'єктами. Найчастіше цей зв'язок виникає між об'єктами одного рівня ієрархії та є двоспрямованим. У цьому разі залежність може бути явно виражена лише складниками цих об'єктів. Аналіз зв'язків залежності в мережі дає змогу визначити несуперечність мережі, оптимізувати (мінімізувати) її вміст шляхом вилучення повторюваної (сильно корельованої) інформації.

3. Агрегування (*Agr*) – виражає агрегування кількох елементів нижнього рівня одним елементом верхнього рівня або навпаки – декомпозицію одного елемента верхнього рівня кілька однорідних елементів нижнього рівня.

До наведених типів можна ще додати уточнювальні властивості зв'язків, що характеризують логічні відносини між елементами. У редакторі онтологій *Protégé* існують певні типи відносин (*Object Properties*) [22].

1. Функціональні (*Func*). Якщо властивість є функціональною, то для одного екземпляра може існувати не більше ніж один екземпляр, що має відношення до першого через цю властивість.

2. Обернено-функціональні (*InvFunc*). Якщо властивість є обернено-функціональною, то ця властивість є оберненою до функціональної властивості.

3. Транзитивні (*Trans*). Якщо властивість є транзитивною, то є умова транзитивності: якщо екземпляр *a* пов'язаний з *b*, а *b* пов'язаний з *c*, то можемо зробити висновок, що *a* пов'язаний з *c* через транзитивну властивість.

4. Симетричні (*Symm*). Якщо властивість *x* є симетричною та екземпляр *a* пов'язаний з *b* через таку властивість, то можемо зробити висновок, що *b* також пов'язаний з *a* через властивість *x*.

5. Асиметричні (*Asymm*). Якщо властивість *x* є асиметричною та екземпляр *a* пов'язаний з *b* через таку властивість, то *b* не може бути пов'язаний з *a* через властивість *x*.

6. Рефлексивні (*Ref*). Властивість *x* є рефлексивною, якщо екземпляр *a* пов'язаний сам із собою.

7. Іррефлексивні (*IrRef*). Якщо властивість *x* є іррефлексивною, то вона пов'язує екземпляр *a* і *b* через таку властивість, проте екземпляри *a* та *b* обов'язково мають бути різними.

На рис. 3 подана семантична мережа опису основних об'єктів ескізного проекту, яка відповідає структурі онтологічної моделі. Зазначимо, що ієрархічна деревоподібна модель на рис. 2 доповнена горизонтальними та міжрівневими зв'язками, що роблять структуру мережною. Вказані зв'язки дають змогу надалі виконати структурно-параметричний синтез структури ВТВ з інноваційними компонентами з огляду на ризик комплексування. На рис. 3 сірим кольором позначено елементи, семантичні типи яких можуть бути нечіткими (подані лінгвістичними або інтервальними значеннями).

Пошук аналогічних розробок здійснюється з використанням окремих (найбільш характерних або інноваційних) об'єктів мережі. У цьому описі аналогі також мають бути структуровані – у них виокремлюються елементи, що відповідають елементам семантичної мережі технічної документації на модернізацію ВТВ, а потім виконується порівняння.

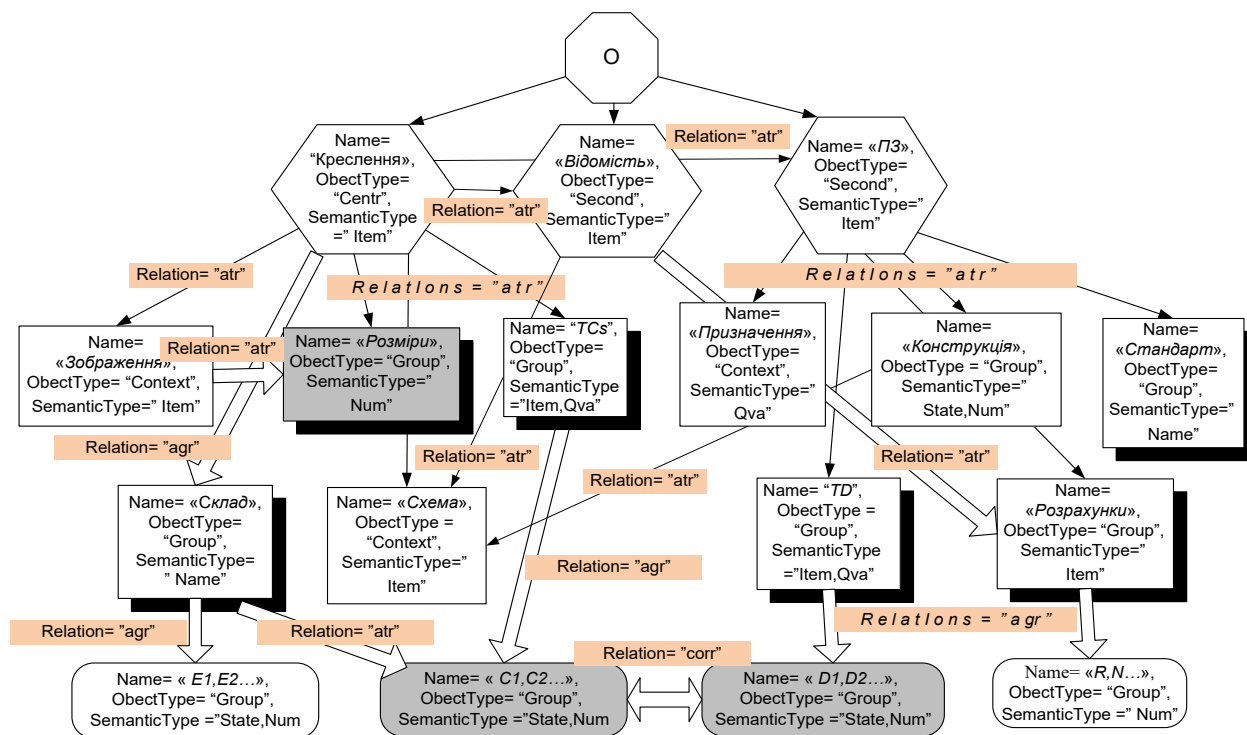


Рис. 3. Семантична мережа опису основних об'єктів ескізного проекту

Висновки

У статті поставлено та виконано завдання подання структури та параметрів компонент високотехнологічних виробів на основі аналізу технічної документації в проектах їх модернізації.

Досліджено основні методи системного подання структури складного виробу, що ґрунтуються на таких принципах: декомпозиція архітектури складного виробу, стратифікація подання складного виробу, багатоваріантність синтезу компонентної архітектури. Розглянуто основні напрями та переваги застосування 3D-технологій для вирішення завдань проектування конструкцій у проектах модернізації компонент високотехнологічних виробів. Запропоновано декомпозицію високотехнологічного виробу на компоненти та часткові параметри з огляду на функціональні, структурні та параметричні характеристики. Сформовано ієрархічну деревоподібну онтологічну модель подання високотехнологічного виробу на основі документів із комплексу технічної документації та зважаючи на додаткові різномірні джерела

інформації. На її основі створено семантичну мережу опису основних об'єктів компонента ВТВ на прикладі ескізного проекту. Виокремлено інноваційні елементи, опис яких може бути нечітким.

Запропонована онтологічна модель може бути основою для пошуку близьких (аналогічних) рішень щодо конструкції іноваційних компонент у базі прецедентів. У разі відсутності близьких рішень проектування іноваційних компонент може бути здійснено із застосуванням 3D-технологій на основі доповнення нечіткої інформації моделі.

Отже, науковою новизною цього дослідження є розроблення онтологічної моделі іноваційних компонент високотехнологічного виробу, яка, на відміну від наявних, сформована з інформації різномірних джерел у вигляді семантичної мережі з нечіткими елементами, що дає змогу підвищити ефективність пошуку аналогічних розробок.

Напрямом подальших досліджень є створення методу оцінювання близькості аналогічних іноваційних розробок з огляду на нечіткі елементи опису параметрів компонент ВТВ.

Список літератури

1. Федорович О. Є., Прончаков Ю. Л. Системне моделювання стратегічних цілей підприємства, що розвивається в умовах обмежених можливостей. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 2. С. 53–60. DOI: 10.32620/aktt.2020.2.08

2. Lindgren M., Bandhold H. Scenario Planning: *The link between future and strategy*. Palgrave Macmillan UK, 2002. 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620
3. Федорович О. Є., Яшина О. С., Белецький І. В. Компонентне проектування аерокосмічної техніки. Харків: Національний аерокосмічний університет «ХАІ». 2012. 180 с.
4. Узунов О. В. Системне представлення складних технічних об'єктів в задачах аналізу та синтезу. *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Машинобудування*. 2016. № 1. С. 126–132. DOI: 10.20535/2305-9001.2016.76.68755
5. Артюшин Л., Кононов О., Єрко В. Визначення результуючої множини варіантів при багатоеритерійному виборі складу бортового обладнання бойових літаків для їх модернізації. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2021. № 17 (24). С. 20–26. DOI: 10.54858/dndia.2021-17-3
6. Яблонський П. М. Деякі питання узагальнення засобів геометричного моделювання для проектування технічних об'єктів. *Сучасні проблеми моделювання*. 2019. № 13. С. 192–198. URL: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2662/3179>
7. Konotop D. I., Zinchenko V. P. 3D-models design concept of complex technical objects using knowledge-based technology. *Механіка гіроскопічних систем*. Вип. 34. 2017. С. 5–13. DOI: 10.20535/0203-3771342017130222
8. Сікора Л.С., Лиса Н.К., Міюшкович Ю.Г., Марцишин Р.С. та ін. Інформаційні технології ідентифікації структури ієрархічних систем для підтримки рішень в конфліктних ситуаціях. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2020. № 2 (44). С. 8–38.
9. Xiao X., Joshi S. Decomposition and sequencing for a 5-axis hybrid manufacturing process. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2020. Vol. 84256. DOI: 10.1115/MSEC2020-8385
10. Abdulsamad H., Peters J. Hierarchical decomposition of nonlinear dynamics and control for system identification and policy distillation. *Proceedings of the 2nd Conference on Learning for Dynamics and Control*. In: *Proceedings of Machine Learning Research*. 2020. Vol. 120. P. 904-914. URL: <https://proceedings.mlr.press/v120/abdulsamad20a.html>
11. Kirchhoffer H. et al. Overview of the neural network compression and representation (NNR) standard. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2021. Vol. 32. No. 5. P. 3203–3216. DOI:10.1109/TCSVT.2021.3095970
12. Чернишов Д., Ситніков Д. Бінарна класифікація на основі поєднання теорії приблизних множин і дерев рішень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 4 (26), С. 87–94. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.26.087
13. Коваленко О. Онтологія та модель трансформації інформації в ситуаційних агентних системах. *Електронне моделювання*. 2020. Т. 42. № 5. С. 5–23. DOI:10.15407/emodel.42.05.005
14. Kulvatunyou B., Wallace E.K., Kiritsis D., Smith B., Will C. The Industrial Ontologies Foundry Proof-of-Concept Project. *International Conference Advances in Production Management Systems (APMS 2018)*. In: *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_50
15. Karray M. H., Ameri F., Hodkiewicz M., Louge T. ROMAIN: Towards a BFO compliant Reference Ontology for Industrial Maintenance. *Applied Ontology*. 2019. No. 14 (2). P. 1–24. DOI: 10.3233/AO-190208
16. Tebes G. et al. Analyzing and documenting the systematic review results of software testing ontologies. *Information and Software Technology*. 2020. Vol. 123. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.infsof.2020.106298
17. Beskorovainyi V., Kolesnyk L., Mgbere D. C. Mathematical models for determining the pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 2(24), С. 16–26. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.24.016
18. UTC Aerospace Systems. URL: https://www.linkedin.com/company/utc-aerospace-systems/?trk=public_profile_profile-section-card_subtitle-click&originalSubdomain=ua (дата звернення: 05.02.2024)
19. Конотоп Д. І. Знання-орієнтована система при проектуванні літальних апаратів. *Механіка гіроскопічних систем*. 2022. Вип. 44. С. 133–142. DOI: 10.20535/0203-3771442022284641
20. Adisorn T., Tholen L., Götz T. Towards a digital product passport fit for contributing to a circular economy. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 8, art. 2289. DOI: 10.3390/en14082289
21. ДСТУ 3974-2000. Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Загальні положення. URL: https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/standarts/DSTU_3974-2000.pdf (дата звернення: 06.04.2024)
22. Malyyeva O., Nosova N., Fedorovych O., Kosenko V. The semantic network creation for an innovative project scope as a part of project knowledge ontology. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2362. P. 301–311. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Semantic-Network-Creation-for-an-Innovative-as-Malyeyeva-Nosova/40932bf666b79ae2d6d0e808364beabe0e05519b>
23. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. URL: <https://protege.stanford.edu> (дата звернення: 13.02.2024)

References

1. Fedorovych, O. Ye. & Pronchakov, Yu. L. (2020), "System modeling of strategic goals of an enterprise that develops in conditions of limited opportunities" ["Systemne modelyuvannya stra-tehichnykh tsiley pidpnyemstva, shcho rozvyvayet'sya v umovakh obmezhenykh mozhlyvostey"], *Aerospace Technic and Technology*, No. 2, P. 53–60. DOI: 10.32620/akt.2020.2.08

2. Lindgren, M., Bandhold, H. (2002), "Scenario Planning The link between future and strategy", *Palgrave Macmillan UK*, 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620
3. Fedorovych, O.E., Yashina, O.S., Beletskyi, I.V. (2012), "Component design of aerospace equipment" ["Komponentne proektuvannya aerokosmichnoyi tekhniki"], Kharkiv: *National Aerospace University "KhAI"*, 180 p.
4. Uzunov, O. V. (2016), "System representation of complex technical objects in the tasks of analysis and synthesis" ["Systemne predstavlenya skladnykh tekhnichnykh ob'yektiv v zadachakh analizu ta syntezy"], *Bulletin of the National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute, Series: Mechanical engineering*, No. 1, P. 126–132. DOI: 10.20535/2305-9001.2016.76.68755
5. Artushin, L., Kononov, O., Yerko, V. (2021), "Determination of the resulting set of options in the multi-item selection of the composition of on-board equipment of combat aircraft for their modernization" ["Vyznachennya rezul'tuyuchoyi mnozhyny variantiv pry bahatoeryerynomu vybori skladu bortovoho obladnannya boyovykh litakiv dlya yikh modernizatsiyi"], *Collection of scientific works of the State Research Institute of Aviation*, No. 17 (24), P. 20–26. DOI: 10.54858/dndia.2021-17-3
6. Yablonsky, P.M. (2019), "Some issues of generalization of geometric modeling tools for the design of technical objects" ["Deyaki pytannya uzahal'nennya zasobiv heometrychnoho modelyuvannya dlya proektuvannya tekhnichnykh ob'yektiv"], *Modern modeling problems*, No. 13, P. 192–198. available at: <http://magazine.mdpu.org.ua/index.php/spm/article/view/2662/3179>
7. Konotop, D. I., Zinchenko, V. P. (2017), "3D-models design concept of complex technical objects using knowledge-based technology", *Mechanics of gyroscopic systems*, Vol. 34, P. 5–13. DOI: 10.20535/0203-3771342017130222
8. Sikora, L.S., Lysa, N.K., Miyushkovich, Y.G., Martysyshyn, R.S. et al. (2020), "Information technologies for identifying the structure of hierarchical systems to support decisions in conflict situations" ["Informatsiyi tekhnolohiyi identyfikatsiyi struktury iyerarkhichnykh system dlya pidtrymky rishen' v konfliktnykh sytuatsiyakh"], *Computer technologies of printing*, No. 2 (44), P. 8–38.
9. Xiao, X., Joshi, S. (2020), "Decomposition and sequencing for a 5-axis hybrid manufacturing process". *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Vol. 84256. DOI: 10.1115/MSEC2020-8385
10. Abdulsamad, H. Peters, J. (2020), "Hierarchical Decomposition of Nonlinear Dynamics and Control for System Identification and Policy Distillation", *Proceedings of the 2nd Conference on Learning for Dynamics and Control*. In: *Proceedings of Machine Learning Research*, Vol. 120, P. 904–914. available at: <https://proceedings.mlr.press/v120/abdulsamad20a.html>
11. Kirchhoffer, H. et al. (2021), "Overview of the neural network compression and representation (NNR) standard", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 32, No. 5, P. 3203–3216. DOI:10.1109/TCSVT.2021.3095970
12. Chernyshov, D., Sytnikov, D. (2023), "Binary classification based on a combination of approximate set theory and decision trees" ["Binarna klasyfikatsiya na osnovi poyednannya teoriiy pryblyznykh mnozhyn i derev rishen'"], *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 4 (26), P. 87–94. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.26.087
13. Kovalenko, O. (2020), "Ontology and model of information transformation in situational agent systems" ["Ontolohiya ta model' transformatsiyi informatsiyi v sytuatsiynykh ahentnykh systemakh"], *Electronic modeling*, Vol. 42, No. 5, P. 5–23. DOI: 10.15407/emodel.42.05.005
14. Kulvatunyou, B., Wallace, E.K., Kiritsis, D., Smith, B., Will, C. (2018), "The Industrial Ontologies Foundry Proof-of-Concept Project", *International Conference Advances in Production Management Systems (APMS 2018)*. In: *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. DOI: 10.1007/978-3-319-99707-0_50
15. Karray, M. H., Ameri, F., Hodkiewicz, M., Louge, T. (2019), Romain: Towards a BFO compliant Reference Ontology for Industrial Maintenance. *Applied Ontology*, No. 14 (2), P. 1–24. DOI: 10.3233/AO-190208
16. Tebes, G. et al. (2020), "Analyzing and documenting the systematic review results of software testing ontologies", *Information and Software Technology*, Vol. 123, P. 1–23. DOI: 10.1016/j.infsof.2020.106298
17. Beskorovainyi, V., Kolesnyk, L., Mgbere, D. C. (2023), "Mathematical models for determining the pareto front for building technological processes options under the conditions of interval presentation of local criteria", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2(24), P. 16–26. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.016>
18. UTC Aerospace Systems. available at: https://www.linkedin.com/company/utc_aerospace_systems/?trk=public_profile_profile-section-card_subtitle-click&originalSubdomain=ua (last accessed 05.02.2024)
19. Konotop, D. I. (2022), "Knowledge-oriented system in the design of aircraft" ["Znannya-oriyentovana systema pry proektuvanni lital'nykh aparativ"], *Mechanics of gyroscopic systems*, Vol. 44, P. 133–142. DOI: 10.20535/0203-3771442022284641
20. Adisorn, T., Tholen, L., Götz, T. (2021), "Towards a digital product passport fit for contributing to a circular economy", *Energies*, Vol. 14, No. 8, art. 2289. DOI: 10.3390/en14082289
21. "DSTU (National Standard of Ukraine) 3974-2000 System of development and supply of products for production. Rules for performing research and development works. Terms" ["DSTU 3974-2000 Systema rozroblennia ta postavlennia produktsii na vyrobnytstvo. Pravyly vykonannya doslidno-konstruktorskykh robot. Zahalni polozhennia"]. available at: https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/standarts/DSTU_3974-2000.pdf (last accessed 06.04.2024).
22. Mal'yeyeva, O., Nosova, N., Fedorovych, O., Kosenko, V. (2019), The semantic network creation for an innovative project scope as a part of project knowledge ontology", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2362, P. 301–311. available at:

<https://www.semanticscholar.org/paper/The-Semantic-Network-Creation-for-an-Innovative-as-Malyeyeva-Nosova/40932bf666b79ae2d6d0e808364beabe0e05519b>

23. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. available at: <https://protege.stanford.edu> (last accessed 13.02.2024).

Надійшла 10.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Федорович Олег Євгенович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "ХАІ", завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: o.fedorovych@khai.edu, ORCID ID: 0000-0001-7883-1144

Малєєв Леонід Вікторович – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "ХАІ", аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: l.maleev@khai.edu; ORCID ID: 0009-0008-8896-2138

Fedorovych Oleg – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Head at the Department of Computer science and information technologies, Kharkiv, Ukraine.

Malieiev Leonid – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", PhD Student at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

ONTOLOGICAL MODEL OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF COMPONENTS IN HIGH-TECH PRODUCT MODERNIZATION PROJECTS

The subject of the article is models representing the structure and parameters of components in high-tech products based on the analysis of technical documentation in modernization projects. **The purpose** of the proposed research is to enhance the quality of modernization processes of high-tech products by forming an ontological model of the product with innovative components, considering the diversity of information support. The article addresses the following **tasks**: studying the main methods and technologies of system representation of complex product structure; forming a model of structural-functional decomposition of a high-tech product, creating an ontological model of the structure and parameters of a high-tech product based on technical documentation. The following **methods** are applied: systemic approach, methods of functional-structural decomposition, set theory, ontology construction methods, semantic models. The following **results** were obtained: The main methods of system representation of complex product structure were investigated, based on the following principles: decomposition of complex product architecture, layering of complex product representation, multivariate synthesis of component architecture. The main directions and advantages of using 3D technologies for solving design tasks in modernization projects of high-tech product components are considered. The decomposition of a high-tech product into component parts and partial parameters is proposed, taking into account functional, structural, and parametric characteristics. An ontological model of the structure and parameters of a high-tech product is formed based on a set of technical documentation and considering additional heterogeneous sources of information. Innovative elements are identified, the description of which may be fuzzy. **Conclusions.** The proposed ontological model can serve as a basis for finding similar solutions regarding the design of innovative components in the precedent database, which is properly structured. In the absence of similar design solutions, innovative component design can be carried out using 3D technologies based on supplementing fuzzy information in the semantic model.

Keywords: modernization projects; high-tech products; components; decomposition; construction modeling; technical documentation; structure; parameters; ontology; semantic network.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Федорович О. Є., Малєєв Л. В. Онтологічна модель структури та параметрів компонент високотехнологічних виробів у проєктах їх модернізації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2024. № 1 (27). С. 179–191.* DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.179>

Fedorovych, O., Malieiev, L. (2024), "Ontological model of structure and parameters of components in high-tech product modernization projects", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 179–191. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.179>

О. ШКІЛЬ, Д. РАХЛІС, І. ФІЛІПЕНКО, В. КОРНІЄНКО, Т. РОЖНОВА

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ НА ПЛАТФОРМІ SoC

Об'єктом дослідження є процедури автоматизованого проєктування та аналізу алгоритмів цифрового оброблення сигналів на технологічній платформі SoC. **Предмет вивчення** – моделі, методи та процедури проєктування та оптимального вибору компонентів SoC для реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів аудіоспектра. **Метою дослідження** є розроблення моделей та процедур для визначення можливостей компромісного розподілу обчислень алгоритмів оброблення сигналів у циклі автоматизованого проєктування на технологічній платформі SoC за критерієм продуктивності й доцільності використання апаратної та програмної реалізації алгоритмів. У статті розв'язуються такі **завдання**: розгляд процедур взаємодії процесорного ядра з програмованою логікою у складі систем на кристалі; розвиток процедур автоматизованого проєктування та аналізу систем оброблення сигналів із використанням мов програмування та мов опису апаратури для реалізації вбудованих систем. Упроваджуються такі **методи**: імплементація алгоритмів цифрового оброблення сигналів мовою програмування C та інструментів високорівневого синтезу для реалізації IP-блоків, діагностичний експеримент способом генерації тестових патернів сигналів та аналіз результатів оброблення на виході системи. **Досягнуті результати**. На основі аналізу процедур взаємодії процесорного ядра та програмованої логіки на обраній платформі SoC спроектовано модель системи оброблення сигналів аудіоспектра. Практичну реалізацію виконано на базі стеку інструментальних засобів САПР Vivado/Vitis/Vitis HLS. Проведено верифікацію запропонованої моделі з використанням програмованого генератора тестових сигналів та аналізу отриманих характеристик цифрових фільтрів на виході системи. **Висновки**. У статті проаналізовано принципи проєктування вбудованих систем оброблення інформації, що реалізуються в системах на кристалі. Розглянуто принципи побудови та аналізу систем цифрового оброблення сигналів на базі систем на кристалі, що містять програмовану логіку та процесорну частину. Розроблені методи апробовано на алгоритмах CIC- та FIR-фільтрів на технологічній платформі SoC FPGA сімейства ZYNQ-7000 фірми Xilinx.

Ключові слова: вбудовані системи; системи на кристалі; FPGA; мова програмування C; алгоритми цифрового оброблення сигналів; аудіосигнали; цифрові фільтри.

Вступ

Сучасні вбудовані системи з мультимедійним складником дедалі частіше містять завдання цифрового оброблення сигналів. Завдання, що можуть бути виконані, полягають як у покращенні та стисканні відео й аудіо, так і в розпізнаванні та аналізі для подальшого оброблення. Зокрема типове завдання оброблення сигналу аудіоспектра поділяється на аналого-цифрове перетворення, оброблення інформації, видачу результатів на цифро-аналоговий перетворювач. Окремим сегментом виокремлюють апаратні та програмні реалізації аудіоефектів вбудованих платформ, зокрема фільтрації та симуляції луни. У сфері відеоконференційного зв'язку гостро постає проблема формування променя для фільтрації сигналу (*beamforming*).

Технологічною платформою для реалізації вбудованих систем у сфері відеоконференційного зв'язку є системи на кристалі (*System on Chip, SoC*),

у яких інтегруються такі елементи, як процесор (процесори, зокрема спеціалізовані), пам'ять, кілька периферійних пристроїв, спеціалізовані обчислювальні блоки та їх з'єднання. Усе згадане вище становить оптимальний набір для деякого заздалегідь відомого функціонала, наприклад, оброблення та передачі відео- та аудіоінформації [1]. Розвиток інструментів проєктування для SoC сприяв новітній тенденції використання високорівневого синтезу для реалізації IP-блоків (*intellectual property*), що можуть бути синтезовані на FPGA-частині (*Field Programmable Gate Array*) системи на кристалі та інтегровані до платформи. Для реалізації алгоритмів цифрового оброблення сигналів традиційним для SoC вважається реалізація на FPGA-частині. Але через обмеження платформи та можливу відсутність часткової реконфігурації та затримки, що можуть бути нею викликані, постає актуальне питання оптимального розподілу обчислень між апаратною та програмною частиною

SoC в умовах реалізації алгоритмів для оброблення в ділянці звукового спектра частот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [2] розглянуто використання програмованих логічних інтегральних схем *FPGA* у сфері оброблення цифрових сигналів звуку в режимі реального часу. Визначено переваги застосування *FPGA* для досягнення високої продуктивності та низького часу затримки з метою оброблення аудіосигналів. Розглянуто можливості масштабування рішення для розв'язання завдань у багатоканальних системах оброблення.

Приділено увагу класифікації в реальному часі сигналів *FM*-діапазону (*Frequency Modulation*) у роботі [3], також проаналізовано й запропоновано визначення *MFCC*-ознак (*Mel-Frequency Cepstral Coefficients*, коефіцієнти мел-частотного кепстрального перетворення) перед виконанням алгоритму класифікації. Запропонована реалізація дає змогу в реальному часі виконувати автоматичне індексування аудіоданих із *FM*-діапазону. Практичну реалізацію запропонованих рішень виконано на базі *FPGA* сімейства *Virtex-6* від *Xilinx*. Окремо в статті проаналізовано використання ресурсів платформи та отримані параметри швидкодії системи.

У дослідженні [4] розглянуто питання побудови прототипу системи активного шумозниження *ANC* (*Automatic Noise Cancellation*) із застосуванням апаратних засобів на основі *FPGA*. порушено питання вибору реалізації на базі рухомої та фіксованої точки та методи вирішення практичних проблем, які спостерігалися під час виконання роботи. Отримано та проаналізовано характеристики побудованої системи як у разі усунення шуму у вузькому спектрі, так і ширококутового шуму.

Робота [5] демонструє реалізацію модульної системи звукових ефектів затримки на платформі *SoC*. Для виконання проекту використовувалася плата розроблення *ZedBoard*. Програмована логіка на процесорі *Zynq* застосовувалася для оброблення сигналу, а *ARM*-частина (*Advanced RISC Machine*) використовувалася для зв'язку між програмованою логікою та програмним забезпеченням, запущеним на комп'ютері, для керування різними параметрами звукових ефектів у реальному часі.

Інтеграцію бібліотеки *FFMPEG* до платформи *ZYNQ* розглянуто й проаналізовано в доповіді [6].

На стороні системи оброблення (*processing system, PS*) *ZYNQ* використовується відкритий код бібліотеки *FFmpeg* для розбору аудіоданих із мережі у форматі *MP3* з подальшим розпаковуванням у формат *PCM* (*Pulse Coded Modulation*), які передаються на сторону програмованої логіки (*programmable logic, PL*) *ZYNQ* через *DMA* (*Direct Memory Access*). У роботі наведено використання вбудованого *IP*-ядра логічного аналізатора *Vivado ILA* (*Integrated Logic Analyzer*) для відтворення даних, що надходять у *PCM*-форматі. Проаналізовано отриману продуктивність і використані ресурси платформи.

У праці [7] розглядається реалізація оброблення аудіосигналів у режимі реального часу на *FPGA* з аналізом попередніх рішень у вигляді реалізації *Audio IPs*, що розроблялися вручну на *VHDL* або використовувалися заздалегідь визначені *IPs* із середовища розроблення. Наведено приклад використання високорівневого синтезу (*HLS*), який дає змогу здійснювати потік компіляції від високорівневих специфікацій оброблення аудіосигналів *DSP* (*digital signal processing*) до бітових потоків *FPGA*. У статті презентуються принципи та реалізація першого "компілятора аудіо *DSP*", призначеного для *FPGA*. Виконано практичний експеримент із побудовою комплексної системи оброблення аудіосигналів у реальному часі.

У роботі [8] запропоновано використання алгоритму двовимірного швидкого перетворення Фур'є (*2D-FFT*) для вивчення багатьох сучасних систем, застосовуваних у сфері безпеки та біометрії. Упровадження цього алгоритму, що є обчислювально-інтенсивною задачею, обмежене через складність його апаратного проектування. Перша мета цієї роботи – відокремити вплив апаратно-програмного спільного проектування (*Hw/Sw co-design*) на час оброблення та використання ресурсів. По-друге, пропонується інноваційна архітектура для алгоритму *2D-FFT*, протестована на *SoC Zynq*, що вимагає менше часу оброблення та пам'яті порівняно з традиційним алгоритмом. У цій статті запропоновано три реалізації алгоритму *2D-FFT* з використанням *SoC Zynq*. Перша основана на процесорі *ARM*. Друга – це рішення з апаратно-програмним проектом традиційного алгоритму *2D-FFT* на гібридній платформі, яка поєднує процесор *ARM Cortex-A9* з *FPGA*. Третя також є рішенням з апаратно-програмним ко-дизайном, що використовує оптимізований алгоритм *2D-FFT* для аналізу в реальному часі високороздільних зображень.

Визначено продуктивність запропонованих методів і наведено фрагменти практичних реалізацій.

Деталі реалізації та дослідження особливостей оброблення зображень у реальному часі на платформі *FPGA* наведено в статті [9], де виконано реалізацію типових алгоритмів оброблення зображень на основі *HLS*-інструменту. Проаналізовано продуктивність і окреслено особливості реалізації таких алгоритмів, як ерозія, лінійна фільтрація та розширення.

Розгляд питання реалізації класичних алгоритмів *DSP* в аудіоспектрі запропоновано в дослідженні [10], де подано реалізації класичних звукових ефектів, реалізованих на *FPGA*. Поєднуючи методи цифрового оброблення сигналів *DSP* з можливостями мови *VHDL*, пропонуються ефективні архітектури з погляду використання ресурсів. Застосовується чип *Artix 7* від *Xilinx* разом із *Xilinx Vivado Design Studio 2020.1*. Проаналізовано результати використання ресурсів платформи.

Робота [11] демонструє переваги методології ко-дизайну *HW/SW* на платформі *SoC* для оброблення звуку. Час розроблення та продуктивність проектування суттєво покращено завдяки створенню блокових конструкцій. Вивчено можливості використання середовищ *Matlab/Simulink* для проектування обраних аудіоефектів та їх подальшого синтезу у вигляді *IP*-ядер на обраній платформі.

У праці [12] розглядається реалізація алгоритму *Big Bang-Big Crunch (BB-BC)* на платформі *FPGA Xilinx Virtex-5*. Пропонується реалізація паралельної архітектури обчислення для фаз *BB-BC* алгоритму та виконується порівняльний аналіз із програмною реалізацією на платформі *CUDA* й високорівневим синтезом із використанням *Vitis HLS*.

Проблема застосування довгої арифметики на платформі *FPGA* досліджується в роботі [13]. Запропоновано вирішення проблеми завдяки використанню фреймворку *Impress*, що автоматично обирає оптимальні вирази на основі вимог до ресурсів певної програми. *Impress* автоматично перетворює вирази множення цілих чисел у поведінкові описи мовою *C++* та ініціює компіляцію для платформи *FPGA* з високорівневого синтезу. *Impress* пропонує високий контроль над використанням і балансом ресурсів платформи.

Процес реалізації та ко-дизайну трансиверу *WiFi* діапазону з використанням *HLS* аналізується в дослідженні [14]. Проаналізовано продуктивність отриманої реалізації з аналогом мовами *VHDL/Verilog* та діагностичний експеримент на практиці

з використанням *SDR*-приймача (*Software-Defined Radio*). Наведено висновки щодо доцільності застосування *HLS*-синтезу на платформі *SoC* для високошвидкісного оброблення сигналів.

Дослідження процесу побудови алгоритмів оброблення відео та аудіо в реальному часі наведено в праці [15], де використано плату налагодження *ZedBoard* як платформу для реалізації запропонованих рішень. У роботі описано покрокову реалізацію системи та досягнуто результатів продуктивності, беручи до уваги реалізацію алгоритмів оброблення аудіо на *Verilog* і відео частини на *VHDL*.

З огляду на наявні роботи та завдання у сфері реалізації цифрових фільтрів разом із зростанням обчислювальних потужностей *SoC* доцільно визначити оптимальний розподіл обчислювальних витрат алгоритму фільтрації між *PL*- і *PS*-частинами *SoC*.

Як приклад реалізації цифрових фільтрів на платформі *SoC* розглядається гребінчастий фільтр та фільтр нижніх частот із кінцево-імпульсною характеристикою. Метою дослідження є розроблення моделей та процедур для визначення можливостей компромісного розподілу обчислень алгоритмів оброблення сигналів у циклі автоматизованого проектування на технологічній платформі *SoC* за критерієм продуктивності та доцільності використання апаратної та програмної реалізації алгоритмів. Як *SoC* застосовується *Xilinx ZYNQ 7020* з платою налагодження *ZedBoard*.

Проектування та тестування цифрових фільтрів

Загалом вихід більшості алгоритмів *DSP* може бути описано як

$$y[n] = T\{x[n]\}, \quad (1)$$

де $y[n]$ – значення на виході системи;

$x[n]$ – вхідне значення;

T – функція оброблення.

Для лінійних дискретних систем є загально визначеним вираз згортки (\star) з метою отримання вихідного значення системи [18–20]. Різницеве рівняння для лінійної системи, що не залежить від часу (*Linear Time Invariant*), має вигляд

$$y[n] = T\{x[n]\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h[k]x[n-k] = h[n] \star x[n], \quad (2)$$

де $h[k]$ – імпульсна характеристика фільтра;

$h[n]$ – імпульсна характеристика фільтра, яка згортається із вхідними відліками $x[n]$.

Для задач реалізації фільтрів із кінцево-імпульсною характеристикою із сімейства алгоритмів DSP необхідно реалізувати одновимірну згортку (операцію *convolution*) з імпульсною

характеристикою фільтра. Приклад операції згортки наведено на рис. 1 [21].

Для проектування фільтрів та отримання необхідних значень коефіцієнтів використано програмний пакет *MATLAB Online* та інструмент *filterDesigner* (рис. 2).



Рис. 1. Візуалізація згортки з дельта-функцією

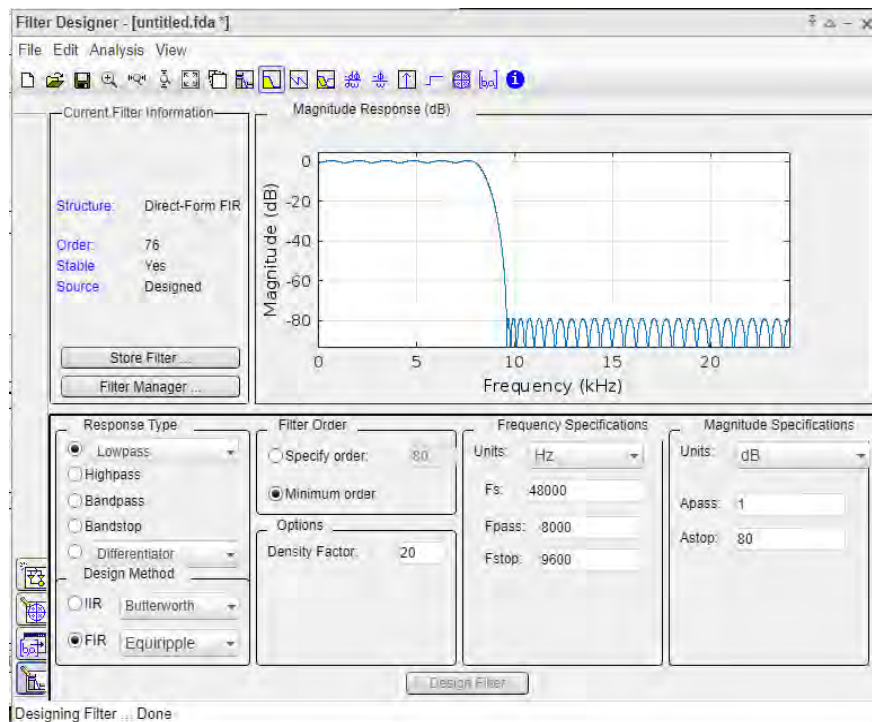


Рис. 2. Середовище *Filter Designer* у *MATLAB* для визначеного КІХ-фільтра

Filter Designer дає змогу обрати необхідний тип фільтра з кінцево-імпульсною характеристикою (КІХ, *FIR*) або безкінечно-імпульсною характеристикою (БІХ, *IIR*) та частотні параметри фільтра.

У разі реалізації КІХ-фільтра є можливість обрати початкову (F_{pass}) та кінцеву (F_{stop}) частоту пропускну смуги (*transition band*). Для отримання результатів продуктивності було реалізовано *FIR*-фільтр нижніх частот для частотного діапазону людського голосу з мінімальними викривленнями, що можуть бути помітні. Параметри фільтра були відповідно обрані $F_{pass} = 8 \text{ KHz}$ та $F_{stop} = 9600 \text{ KHz}$.

З метою тестування моделі фільтра використано інтерактивне середовище розробки *Jupyter Notebook* з візуалізацією на базі бібліотеки *Matplotlib*. Тестування виконано шляхом застосування вбудованих функцій *lfilter* та отримання спектрів вхідного та вихідного сигналів із застосуванням перетворення Фур'є на сигналі до і після фільтрації. До фільтрації вхідний сигнал був створений із синусоїдальних компонент визначеного набору частот, а саме 50, 300, 5000, 9000, 10000, 12000, 15000 Гц відповідно з обраною частотою дискретизації 48 КГц. На рис. 3 зображено отримані спектри вхідного та вихідного сигналів.

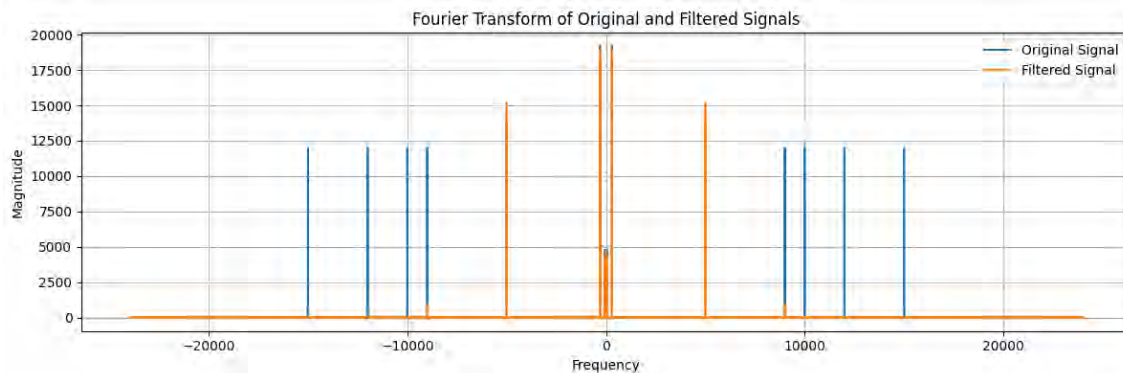


Рис. 3. Тестування KIX-фільтра з використанням *Jupyter Notebook* та *Matplotlib*

Порівняльний аналіз апаратної та програмної реалізації фільтрів

Платформа *Xilinx ZYNQ* містить частини *PL* і *PS*. *PS*-частина реалізована у вигляді двох повноцінних *ARM Cortex A9* ядер із технологією *ARM Neon* для реалізації інструкцій *Single Instruction Multiple Data (SIMD)*. Отже, є можливість використовувати для реалізації *DSP*-алгоритмів як *ARM*-частину без застосування *SIMD*-інструкцій, так і з ними. Окремо виокремлюється частина *PL*, на якій можуть бути реалізовані апаратно спеціалізовані *IP*-ядра для потреб користувача та реалізована взаємодія з *PS*-частиною з використанням шини *AXI (Advanced eXtensible Interface)*. Технологія *Arm Neon* – це вдосконалене розширення архітектури *SIMD* для процесорів *A-profile* і *R-profile*. Регістри *Neon* розглядаються як вектори елементів одного типу даних з інструкціями *Neon*, що діють на кілька елементів одночасно. Підтримується декілька типів даних, зокрема операції з рухомою точкою та цілочисельна арифметика. Технологія *Neon* призначена для покращення мультимедійної взаємодії з користувачем шляхом прискорення кодування та декодування аудіо та відео, реалізації інтерфейсів користувача, двовимірної та тривимірної графіки, ігор. *Neon* також може прискорити алгоритми оброблення сигналів і функції для таких завдань, як оброблення аудіо та відео, розпізнавання голосу й обличчя, комп'ютерний зір і "глибоке" навчання (*deep learning*) [17].

Робота з прискорювачем *NEON* у *ARM* є можливою або з використанням *Intrinsic* функцій компілятора, або із застосуванням офіційних бібліотек. Одним із варіантів є розроблення на базі бібліотеки *NE10* від офіційного виробника. *NE10* містить як програмну реалізацію типових

алгоритмів *DSP*, так і прискорену з використанням *NEON*. Залежно від наявності *NEON* на цільовому ядрі обираються відповідні реалізації. Додатково, під час компіляції бібліотеки потрібно вказати необхідний доступний функціонал і рівень оптимізації. У нашій ситуації було вказано максимальний рівень оптимізації компілятора – *O3* – та додатково було долучено *-ffast-math* як для бібліотеки, так і для програмної частини застосунку. Окремо було додано прапорець (*flag*) збірки специфічної для *ARM*-частини *ZYNQ*.

Для реалізації функціоналу *FIR*-фільтра на базі бібліотеки *NE10* необхідно ініціалізувати *NE10* та встановити параметри фільтра. Зокрема вказати *state_buffer*, у якому зберігаються проміжні результати оброблення на базі структури циклічного буферу. Після ініціалізації бібліотеки та структури фільтра необхідно викликати *ne_10_fir_float*, до якого потрібно передавати отриманий вхідний блок і конфігураційну структуру фільтра.

З метою визначення продуктивності апаратної реалізації було виконано *FIR*-фільтри з використанням константного набору коефіцієнтів для отримання оптимізації *constant multiplier propagation* та додаткової оптимізації із застосуванням властивості симетрії коефіцієнтів. Через те що коефіцієнти фільтра є симетричними щодо центрального відліку, було реалізовано підхід, описаний у дослідженні [22], а саме зменшення кількості операцій множення завдяки використанню симетрії коефіцієнтів. Цей підхід дає змогу отримати більш оптимальну реалізацію після високорівневого синтезу.

У разі непарної кількості коефіцієнтів центральний коефіцієнт потрібно розраховувати окремо, оскільки немає операції попереднього додавання. Для фільтра з п'яти коефіцієнтів (0.078, 0.253, 0.335, 0.253, 0.078) припустимий масив

коефіцієнтів $h[5]$, які є симетричними щодо центрального коефіцієнта:

$$ac_{fixed} \langle 8.1 \rangle h[5] = \{0.078, 0.253, 0.335, 0.253, 0.078\},$$

де $ac_{fixed} \langle 8.1 \rangle$ – це вбудований тип даних для реалізації операцій арифметики з фіксованою точкою,

$$temp = h[0] * regs[0] + h[1] * regs[1] + h[2] * regs[2] + h[3] * regs[3] + h[4] * regs[4],$$

де $regs[i]$, $i = \overline{0,4}$ – це буфери для зберігання вхідних значень сигналу x .

$$temp = 0.078 * (regs[0] + regs[4]) + 0.335 * regs[2] + 0.253 * (regs[1] + regs[3]).$$

Діаграму КІХ-фільтра із вказаною оптимізацією наведено на рис. 4.

Особливостями реалізації можна вважати використання типів *ap_fixed* та *shift_class* для реалізації циклічного буферу. Для передачі вхідних

де 8 – розмірність даних, 1 – кількість біт для зберігання цілої частини.

Розгортання циклу множення-складання (*multiply-accumulate, MAC*) має такий вигляд:

Тоді для прикладу фільтра з п'яти коефіцієнтів можна записати:

семплів (дискретних значень сигналів) застосовано інтерфейси *AXI-Lite* та *AXI-HP*. Після синтезу *IP*-ядра для обраного *SoC* було отримано структуру викликів, зображену на рис. 5, після оптимізації *Vitis HLS*.

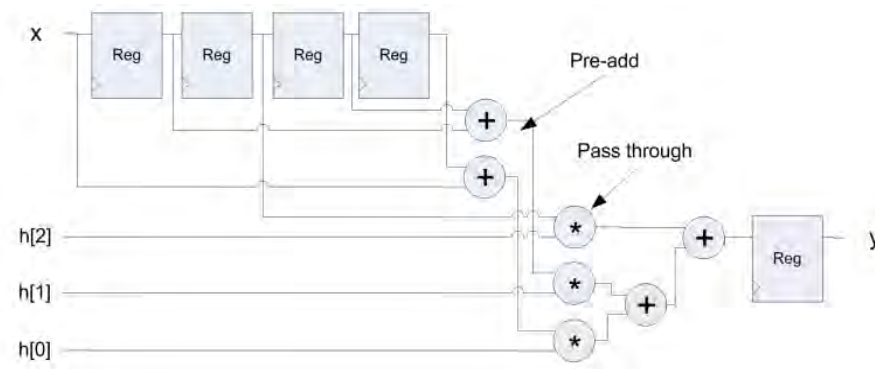


Рис. 4. Структура фільтра з непарною симетрією коефіцієнтів

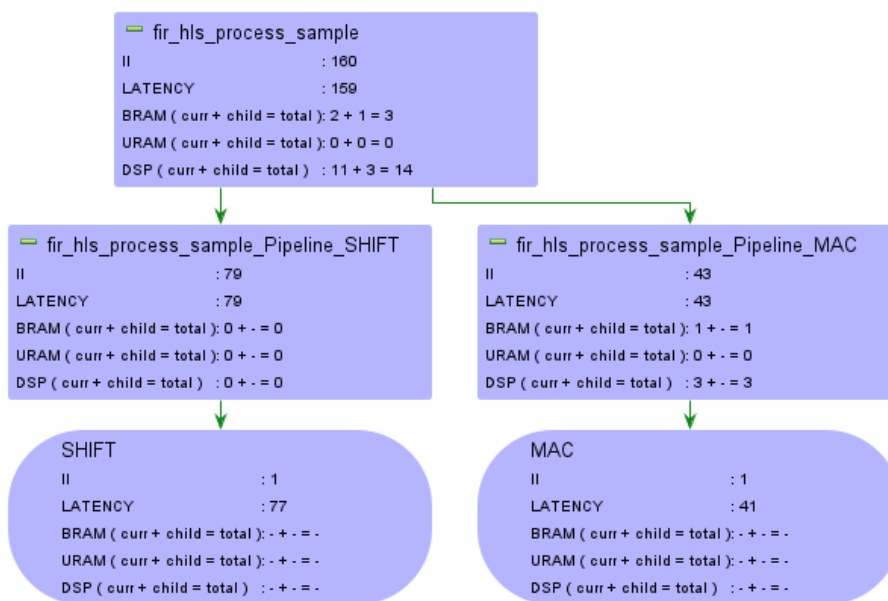


Рис. 5. Діаграма викликів *FIR*-фільтра в середовищі *Vitis HLS*

Гребінчастий фільтр реалізується на базі кільцевого буферу для побудови лінії затримки та опційних блоків коефіцієнтів для вхідних

і вихідних семплів сигналу. Загальна структура гребінчастого фільтра зі зворотними зв'язками (*feedforward*) зображена на рис. 6.

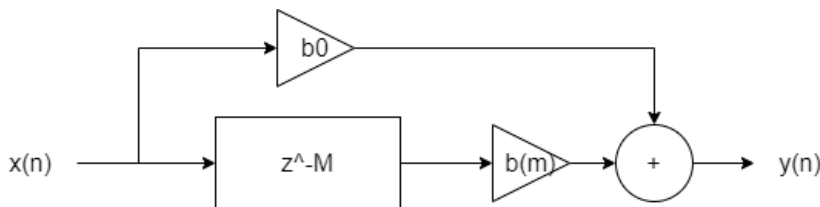


Рис. 6. Загальна структура *feedforward* гребінчастого фільтра

На рис. 6 b_0 – це коефіцієнт множення вхідних семплів; z^{-M} – затримка вхідного сигналу на M семплів; $b(m)$ – послаблення затриманих семплів. Отже, прямий сигнал $x(n)$ подається в обхід та на лінію затримки. Вихід $y(n)$ є лінійною комбінацією прямого та затриманого сигналу [23]. Для реалізації гребінчастого фільтра було реалізовано кільцевий буфер з метою збереження вхідних семплів та формування лінії затримки. Окремо впроваджено методи для встановлення довжини лінії затримки та передачі вхідних семплів сигналу. Для реалізації профілювання часу виконання функцій було реалізовано макрос, що використовує вбудований таймер *ARM A9* через виклик *XTime_GetTime()* з *Vitis SDK*.

Методика ко-дизайну для розроблення на технологічній платформі SoC

Метод ко-дизайну в умовах використання *SoC* є схожим із типовим процесом проектування для системи на кристалі. Зокрема етапи проектування передбачають розроблення та написання *testbench* для окремих *IP*-блоків оброблення даних. Подальші етапи містять інтеграцію до *System Block Design* розроблених блоків і налаштування процесорної частини *ZYNQ*. Для взаємодії з процесорним ядром типовим є використання шини *AXI-Lite* для конфігураційних параметрів блоків або передачі незначних обсягів інформації. Для обміну даними, що є критичними за часом їх оброблення, доцільно застосовувати шини *AXI Stream* для пересилання між *IP*-ядрами та *DMA+DDR* з метою взаємодії між процесорною та *FPGA*-частинами системи. Програмна частина пристрою розробляється в середовищі *Vitis IDE*, створення та тестування *IP*-блоків виконується у *Vitis HLS*. Фінальна

інтеграція апаратної частини відбувається в середовищі *Vivado IDE*. Зазначимо, що платформа підтримує як можливе використання *PetaLinux* для створення образу системи, так і можливу роботу в режимі *baremetal* або із застосуванням *FreeRTOS* як операційної системи реального часу.

Основні деталі типового маршруту проектування для платформи *SoC* наведено в роботі [16], де викладено основні етапи створення проекту вбудованої системи з особливостями налагодження програмного забезпечення та фінальної інтеграції системи.

Архітектура системи

З метою реалізації оброблення алгоритмів сигналів у аудіоспектрі на апаратній платформі *SoC* необхідно формувати відповідну архітектуру системи. Зокрема потрібно визначити можливість використання алгоритмів, розроблених на *PS*-частині до переносу їх у середовище *Vitis HLS*, і тестування у вигляді *IP*-блоків. Для перевірки та порівняльного аналізу використано середовище аналізу *ARTA*. З інтерфейсних блоків, що були реалізовані, є трансивер *I2S* аудіоінтерфейсу, блок *AXI GPIO* для задання адреси аудіокодеку та переключення фільтрів під час роботи системи, блок *AXI-I2C* для первинної конфігурації аудіокодеку та призначення вхідних і вихідних інтерфейсів аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів (АЦП та ЦАП), що вбудовані в кодек. Також окремо застосовано блок *UART* для видачі діагностичних повідомлень. Реалізацію фільтрів виконано на базі бібліотеки *NE10*, для синтезу *IP*-блоків використано *Vitis HLS*, зважаючи на *high-level-synthesis*-специфічні особливості. Тестування фільтрів виконувалося в середовищі *Scipy* разом з *Jupyter Notebook* і розробленими скриптами. На рис. 7 зображено архітектуру розробленої системи на базі *ZYNQ* та плати налагодження *ZedBoard* для експериментального дослідження.

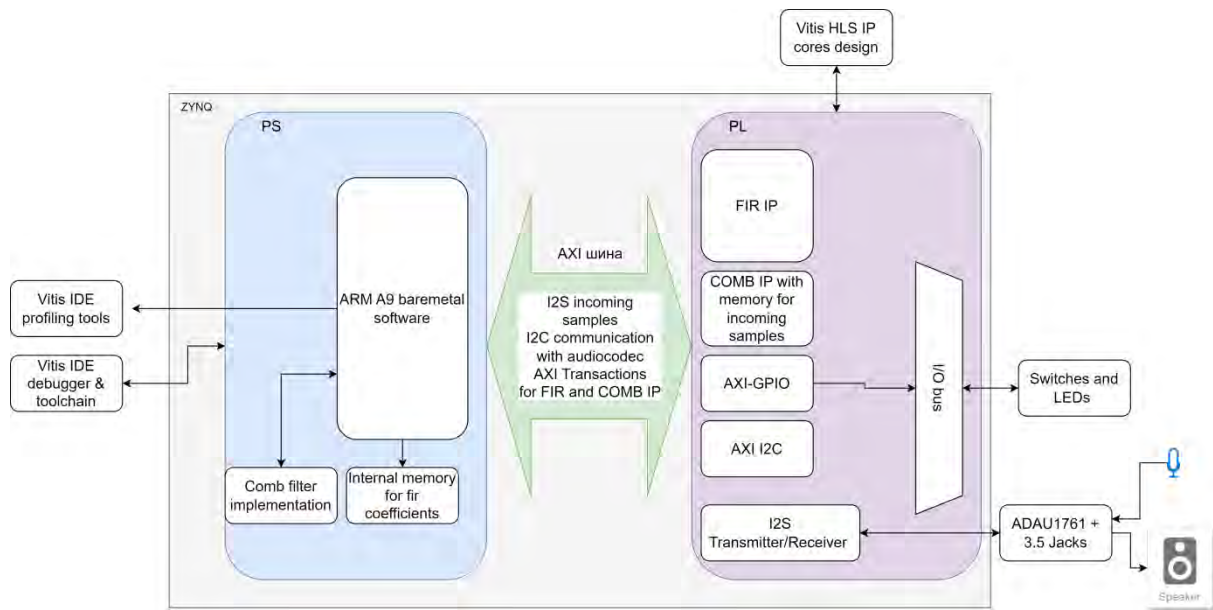


Рис. 7. Архітектура розробленої системи на базі SoC та плати налагодження ZedBoard

Розроблену архітектуру реалізовано в середовищі Vivado IDE з інтеграцією IP-ядер грєбінчастого та FIR-фільтрів. Було додано блоки I2S/I2C периферії.

Діаграму реалізованої системи, отриманої в середовищі Vivado, наведено на рис. 8.

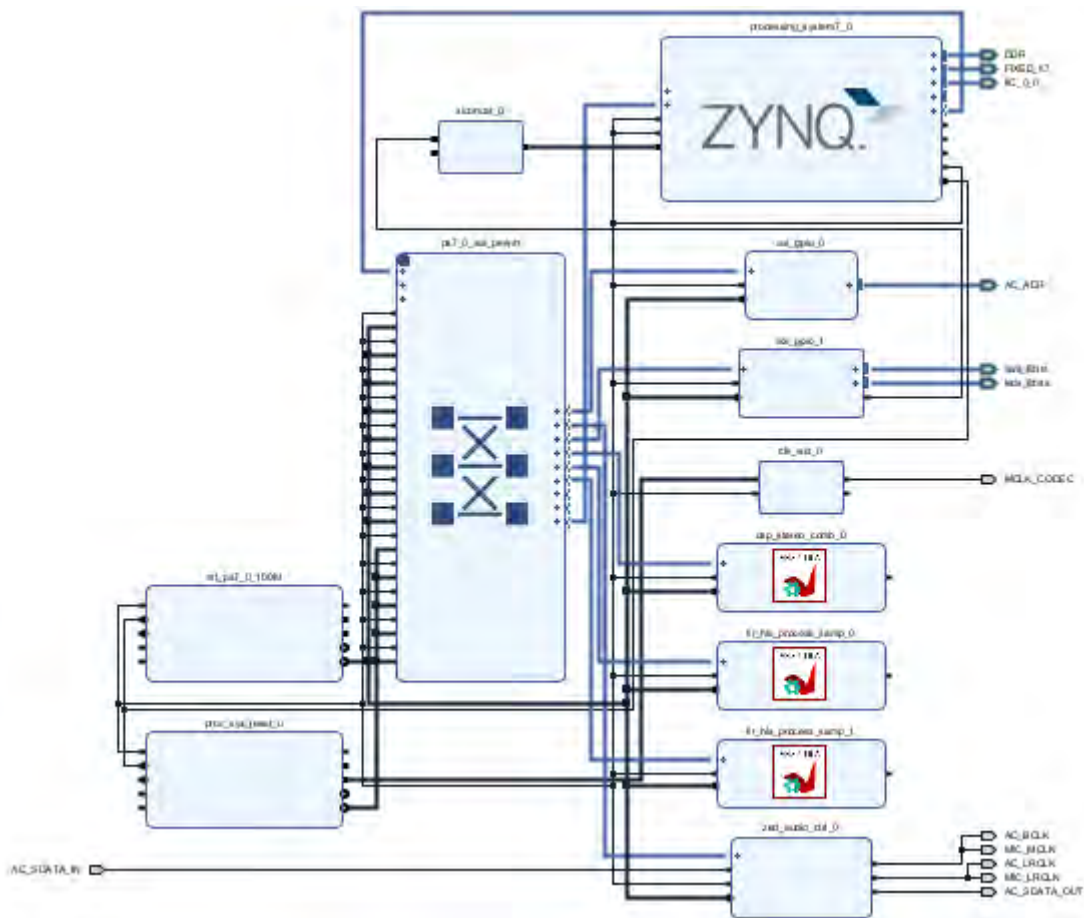


Рис. 8. Block Diagram розробленої архітектури на базі плати налагодження ZedBoard

Результати досліджень та їх обговорення

У табл. 1 подано результати, отримані для реалізованих моделей фільтра нижніх частот і гребінчастого фільтра з використанням бібліотеки *NE10* з підтримкою *ARM NEON*, *AXI-Lite* та шин *AXI-HP*.

Отже, незважаючи на традиційне припущення щодо досягнення кращих результатів швидкодії в разі перенесення обчислень на апаратну частину *SoC (PL)*, у конкретному випадку оброблення

sample-by-sample без буферизації та блокового оброблення для конкретних фільтрів аудіоспектра досягнуто результат. А саме програмна реалізація з використанням вбудованої бібліотеки *NE10* для роботи з векторними інструкціями *SIMD* бо нативна реалізація може давати кращі часові результати без необхідності перенесення обчислення на апаратну частину. У такому разі *SoC ZYNQ* може застосовуватися як вбудована апаратна платформа з набором периферії, що може бути додана та синтезована за необхідності в частині *PL*.

Таблиця 1. Результати тестування фільтрів низьких частот і гребінчастого фільтра

Тип фільтра	KIX PS-частина		KIX PL-частина			Гребінчастий фільтр	
	з <i>NE10</i>	без <i>NE10</i>	без оптимізації парності коефіцієнтів, шина <i>AXI4-HP</i>	без оптимізації симетрії коефіцієнтів, шина <i>AXI4-Lite</i>	з оптимізацією симетрії коефіцієнтів, шина <i>AXI4-Lite</i>	(програмна реалізація)	(апаратна реалізація)
Використання апаратних ресурсів	–, <i>PS-частина</i>	–, <i>PS-частина</i>	<i>DSP:14</i> <i>FF:2277</i> <i>BRAM:3</i>	<i>DSP:14</i> <i>FF:1441</i> <i>BRAM:3</i>	<i>DSP:14</i> <i>FF:1475</i> <i>BRAM:3</i>	–, <i>PS-частина</i>	<i>LUT:694</i> <i>FF:613</i> <i>BRAM:8</i>
Час виконання на платформі <i>SoC ZYNQ</i>	1.85 us	3.51 us	3.16 us	2.95 us	2.65 us	0.15 us	2.02 us

Висновки та перспективи подальшого дослідження

Унаслідок проведених досліджень розроблено алгоритми фільтрації для вбудованих систем оброблення інформації на платформі *SoC ZYNQ* як у блоці *PS* мовою програмування *C*, так і в блоці *PL* з використанням *Vitis HLS* з метою визначення можливостей компромісного розподілу ресурсів. Під час верифікації здійснено діагностичний експеримент способом генерації тестових шаблонів (патернів) сигналів та аналізу отриманих характеристик фільтрів на виході системи. Тестові послідовності подавалися з допомогою програмованого генератора сигналів. Фіксування результатів діагностичного експерименту здійснювалось завдяки програмному забезпеченню *Arta* та монітору послідовного терміналу *MobaXterm*

з метою отримання спектрограм вихідного сигналу та результатів профілювання алгоритмів. Досягнуті результати аналізувалися як за часом виконання алгоритмів, так і за якісними показниками застосування апаратних і програмних ресурсів. Аналіз показав, що використання *PS-частини* для оброблення *sample-by-sample* було найбільш ефективним. Подальші напрями досліджень передбачають визначення продуктивності реалізації алгоритмів, таких як придушення луни, виділення спектра сигналу людського голосу, реалізацію аудіоефектів, визначення доцільного розподілу обчислень у багатоканальних системах оброблення звуку, реалізацію *DOA (Direction Of Arrival)* сімейства алгоритмів для мікрофонних матриць та аналіз реалізації алгоритмів компресії на базі кодеків *OPUS* і *Vorbis*.

Список літератури

- Lee E. A., Seshia S. A. Introduction to embedded systems: A cyber-physical system approach. MIT Press, 2017. 564 p. URL: https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/releases/LeeSeshia_DigitalV2_2.pdf (дата звернення: 04.02.2024).
- Popoff M., Michon R., Risset T., Orlarey Y., Letz S. Towards an FPGA-based compilation flow for ultra-low latency audio signal processing. *Proceedings of the 19th Sound and Music Computing (SMC-22)*, June 5–12, Saint-Étienne, France. 2022. P. 555–562. DOI: [10.1109/ASAP57973.2023.00018](https://doi.org/10.1109/ASAP57973.2023.00018)
- Wassi G., Iloga S., Romain O., Granado B., Tchuente M. FPGA-based simultaneous multichannel audio processor for musical genre indexing applications in broadcast band. *Journal of parallel and distributed computing*. 2018. Vol. 119. P. 146–161. DOI: [10.1016/j.jpdc.2018.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.02.011)
- Wang T., Bohanan S. Active noise cancellation with FPGA – practical considerations. *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings (NOISE-CON23)*. May 15–18, Grand Rapids, USA. 2023. Vol. 266, no. 1. P. 1036–1043. DOI: [10.3397/NC_2023_0124](https://doi.org/10.3397/NC_2023_0124)

5. Cannon D., Fang T., Saniie J. Modular Delay Audio Effect System on FPGA. *IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT)*. May 19–21, Mankato, USA. 2022. P. 248–251. DOI: [10.1109/eIT53891.2022.9813875](https://doi.org/10.1109/eIT53891.2022.9813875)
6. Xie W., Yang F. Design and implementation of audio stream processing based on ZYNQ. *IEEE 6th information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC)*, March 4-6, Chongqing, China. 2022. P. 589–592. DOI: [10.1109/ITOEC53115.2022.9734347](https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.9734347)
7. Popoff M., Michon R., Risset T., Cochard P., Letz S., Orlarey Y., Dinechim de F. Audio DSP to FPGA Compilation: The Syfala Toolchain Approach. Research report №9507. Grame, Emeraude: Inria. 2023. 18 p. URL: <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-04099135/> (дата звернення: 04.02.2024).
8. Kortli Y., Gabsi S., Jridi M., Alfalou A., Atri M. Hw/Sw Co-Design technique for 2D fast fourier transform algorithm on Zynq SoC. *Integration*. 2021. Vol. 82. P. 78–88. DOI: [10.1016/j.vlsi.2021.09.005](https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.09.005)
9. Azzaz M., Maali A., Kaibou R., Kakouche I., Mohamed S., Hamil H. FPGA HW/SW codesign approach for real-time image processing using HLS. *1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP'20)*, May 16–17, EL OUED, Algeria. 2020. P. 169–174. DOI: [10.1109/CCSSP49278.2020.9151686](https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151686)
10. Dragoi C., Anghel C., Stanciu C., Paleologu C. Efficient FPGA Implementation of Classic Audio Effects. *13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI'21)*, July 1-3, Pitesti, Romania. 2021. P. 1–6. DOI: [10.1109/ECAI52376.2021.9515041](https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515041)
11. Esen Y., San İ. Low-latency SoC design with high-level accelerators specific to sound effects. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*. 2021. Vol. 33. P. 78–87. DOI: [10.7240/ijeps.897556](https://doi.org/10.7240/ijeps.897556)
12. Zhang Y., Wang C., Lei G., Lu Y., Sun F., Xu C., Li X., Zhou X. An FPGA-based accelerated optimization algorithm for real-time applications. *Journal of Signal Processing Systems*. 2020. Vol. 92, No. 10. P. 1155–1176. DOI: [10.1109/ISPA/IUCC.2017.00098](https://doi.org/10.1109/ISPA/IUCC.2017.00098)
13. Ustun E., San I., Yin J., Yu C., Zhang Z. IMPress: large integer multiplication expression rewriting for FPGA HLS. *30th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'22)*, May 15–18, New York City, USA. 2022. P.1–10. DOI: [10.1109/FCCM53951.2022.9786123](https://doi.org/10.1109/FCCM53951.2022.9786123)
14. Havinga T., Jiao X., Liu W., Moerman I. Accelerating FPGA-based WI-FI transceiver design and prototyping by high-level synthesis. *31st Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'23)*, May 8–11, Marina Del Rey, USA. 2023. P. 1–7. DOI: [10.1109/FCCM57271.2023.00047](https://doi.org/10.1109/FCCM57271.2023.00047)
15. Deulkar A. S., Kolhare N. R. FPGA implementation of audio and video processing based on Zedboard. *International Conference on Smart Innovations in Design, Environment, Management, Planning and Computing (ICSIDEMPC'20)*, October 30–31, Aurangabad, India. 2020. Vol. 6. P. 143580–143591. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3120470](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120470)
16. Shkil A., Rakhlis D., Filippenko I., Korniienko V. Design and self-diagnostics of cyberphysical control devices on SOC platform. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Vol. 4(26). P. 122–134. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.26.122
17. Neon. Arm Developer. URL: <https://developer.arm.com/Architectures/Neon> (дата звернення: 29.01.2024).
18. Signal processing stack exchange. URL: <https://dsp.stackexchange.com/questions/66451/fir-filtering-operation-also-convolution> (дата звернення: 04.02.2024).
19. Convolution theory. URL: [https://personal.utdallas.edu/~raja1/EE%203302%20Fall%2016/GaTech/cconvdemo/help/theory.html#:~:text=Convolution%20is%20an%20operation%20by,and%20output%20y\(t\)](https://personal.utdallas.edu/~raja1/EE%203302%20Fall%2016/GaTech/cconvdemo/help/theory.html#:~:text=Convolution%20is%20an%20operation%20by,and%20output%20y(t)) (дата звернення: 04.02.2024).
20. Lineartime-invariant systems and convolution. URL: https://redwood.berkeley.edu/wpcontent/uploads/2018/08/lti_convolution.pdf (дата звернення: 04.02.2024).
21. Smith S. W. The scientist and engineer's guide to digital signal processing. 2nd ed. San Diego, Calif: California Technical Pub., 1999. 650 p. URL: <https://ia801301.us.archive.org/23/items/GuideToDigitalSignalProcessing/Guide%20To%20Digital%20Signal%20Processing.pdf>
22. Fingeroff M. High-Level Synthesis Blue Book. Bloomington: Xlibris Corporation, 2010. 286 p. URL: https://www.cse.usf.edu/~haozheng/teach/cda4253/doc/hls/hls_bluebook_uv.pdf (дата звернення: 04.02.2024).
23. Feedforward Comb Filters. URL: https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Feedforward_Comb_Filters.html (дата звернення: 04.02.2024).

References

1. Lee, E. A., Seshia, S. A. (2017), "Introduction to embedded systems: A cyber-physical system approach, MIT Press", 564 p. available at: https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/releases/LeeSeshia_DigitalV2_2.pdf (last accessed: 04.02.2024).
2. Popoff, M., Michon, R., Risset, T., Orlarey, Y., Letz, S. (2022), "Towards an FPGA-based compilation flow for ultra-low latency audio signal processing". *Proceedings of the 19th Sound and Music Computing (SMC-22)*, June 5–12, Saint-Étienne, France, P. 555–562. DOI: [10.1109/ASAP57973.2023.00018](https://doi.org/10.1109/ASAP57973.2023.00018)
3. Wassi, G., Iloga, S., Romain, O., Granado, B., Tchuente, M. (2018), "FPGA-based simultaneous multichannel audio processor for musical genre indexing applications in broadcast band", *Journal of parallel and distributed computing*, Vol. 119, P. 146–161. DOI: [10.1016/j.jpdc.2018.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.02.011)
4. Wang, T., Bohanan, S. (2023), "Active noise cancellation with FPGA – practical considerations", *INTER-NOISE and NOISE-CON congress and conference proceedings (NOISE-CON23)*, May 15–18, Grand Rapids, USA, Vol. 266, no. 1, P. 1036–1043. URL: DOI: [10.3397/NC_2023_0124](https://doi.org/10.3397/NC_2023_0124)

5. Cannon, D., Fang, T., Saniie, J. (2022), "Modular Delay Audio Effect System on FPGA", *IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, May 19–21, Mankato, USA, P. 248–251. DOI: [10.1109/eIT53891.2022.9813875](https://doi.org/10.1109/eIT53891.2022.9813875)
6. Xie, W., Yang, F. (2022), "Design and implementation of audio stream processing based on ZYNQ", *IEEE 6th information technology and mechatronics engineering conference (ITOEC)*, March 4–6, Chongqing, China, P. 589–592. DOI: [10.1109/ITOEC53115.2022.9734347](https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.9734347)
7. Popoff, M., Michon, R., Risset, T., Cochard, P., Letz, S., Orlarey, Y., Dinechim, de F. (2023), "Audio DSP to FPGA Compilation: The Syfala Toolchain Approach", Research report №9507, Grame, Emeraude: Inria, 18 p. available at: <https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-04099135/> (last accessed: 04.02.2024).
8. Kortli Y., Gabsi S., Jridi M., Alfalou A., Atri M. (2021), "Hw/Sw Co-Design technique for 2D fast fourier transform algorithm on Zynq SoC", *Integration*, Vol. 82, P. 78–88. DOI: [10.1016/j.vlsi.2021.09.005](https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2021.09.005)
9. Azzaz, M., Maali, A., Kaibou, R., Kakouche, I., Mohamed S., Hamil H. (2020), "FPGA HW/SW codesign approach for real-time image processing using HLS", *1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP'20)*, May 16–17, EL OUED, Algeria, P. 169–174. DOI: [10.1109/CCSSP49278.2020.9151686](https://doi.org/10.1109/CCSSP49278.2020.9151686)
10. Dragoi, C., Anghel, C., Stanciu, C., Paleologu, C. (2021), "Efficient FPGA Implementation of Classic Audio Effects", *13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI'21)*, July 1–3, Pitesti, Romania, P. 1–6. DOI: [10.1109/ECAI52376.2021.9515041](https://doi.org/10.1109/ECAI52376.2021.9515041)
11. Esen, Y., San, İ. (2021), "Low-latency SoC design with high-level accelerators specific to sound effects", *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, Vol. 33, P. 78–87. DOI: [10.7240/jeeps.897556](https://doi.org/10.7240/jeeps.897556)
12. Zhang, Y., Wang, C., Lei, G., Lu, Y., Sun, F., Xu, C., Li, X., Zhou, X. (2020). "An FPGA-based accelerated optimization algorithm for real-time applications", *Journal of Signal Processing Systems*, Vol. 92, no. 10, P. 1155–1176. DOI: [10.1109/ISPA/IUCC.2017.00098](https://doi.org/10.1109/ISPA/IUCC.2017.00098)
13. Ustun, E., San, I., Yin, J., Yu, C., Zhang, Z. (2022), "Impress: large integer multiplication expression rewriting for FPGA HLS", *30th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'22)*, May 15–18, New York City, USA, P. 1–10. DOI: [10.1109/FCCM53951.2022.9786123](https://doi.org/10.1109/FCCM53951.2022.9786123)
14. Havinga, T., Jiao, X., Liu, W., Moerman, I. (2023), "Accelerating FPGA-based WI-FI transceiver design and prototyping by high-level synthesis", *31st Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'23)*, May 8–11, Marina Del Rey, USA, P. 1–7. DOI: [10.1109/FCCM57271.2023.00047](https://doi.org/10.1109/FCCM57271.2023.00047)
15. Deulkar, A. S., Kolhare, N. R. (2020), "FPGA implementation of audio and video processing based on Zedboard", *International Conference on Smart Innovations in Design, Environment, Management, Planning and Computing (ICSIDEMPC'20)*, October 30–31, Aurangabad, India, Vol. 6, P. 143580–143591. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3120470](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120470)
16. Shkil, A., Rakhlis, D., Filippenko, I., Korniienko, V. (2023), "Design and self-diagnostics of cyberphysical control devices on SOC platform", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, Vol. 4(26), P. 122–134. DOI: 10.30837/ITSSI.2023.26.122
17. "Neon", Arm Developer, available at: <https://developer.arm.com/Architectures/Neon> (last accessed: 29.01.2024).
18. "Signal Processing Stack Exchange", available at: <https://dsp.stackexchange.com/questions/66451/fir-filtering-operation-also-convolution> (last accessed: 04.02.2024).
19. "Convolution Theory", available at: [https://personal.utdallas.edu/~raja1/EE%203302%20Fall%2016/GaTech/cconvdemo/help/theory.html#:~:text=Convolution%20is%20an%20operation%20by,and%20output%20y\(t\)](https://personal.utdallas.edu/~raja1/EE%203302%20Fall%2016/GaTech/cconvdemo/help/theory.html#:~:text=Convolution%20is%20an%20operation%20by,and%20output%20y(t)) (last accessed: 04.02.2024).
20. "Linear time-invariant systems and convolution", available at: https://redwood.berkeley.edu/wp-content/uploads/2018/08/lti_convolution.pdf (last accessed: 04.02.2024).
21. Smith, S. W. (1999), "The scientist and engineer's guide to digital signal processing", 2nd ed., San Diego, Calif: California Tech. Pub., 650 p. available at: <https://ia801301.us.archive.org/23/items/GuideToDigitalSignalProcessing/Guide%20To%20Digital%20Signal%20Processing.pdf> (last accessed: 04.02.2024).
22. Fingeroff, M. (2010), "High-Level Synthesis Blue Book", Bloomington: Xlibris Corporation, 286 p. available at: https://www.cse.usf.edu/~haozheng/teach/cda4253/doc/hls/hls_bluebook_uv.pdf (last accessed: 04.02.2024).
23. "Feedforward Comb Filters", available at: https://www.dsprelated.com/freebooks/pasp/Feedforward_Comb_Filters.html (last accessed: 04.02.2024).

Надійшла 01.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Шкіль Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1071-3445>

Рахліс Дарія Юхимівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна; e-mail: dariia.rakhlis@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6652-1840>

Філіпенко Інна Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна; e-mail: inna.filipenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3584-2107>

Корнієнко Валентин Русланович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна; e-mail: valentyn.korniienko1@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7070-5127>

Рожнова Тетяна Григорівна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харків, Україна; e-mail: tetiana.rozhnova@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4484-8674>

Shkil Alexander – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Design Automation, Kharkiv, Ukraine.

Rakhlis Daria – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Design Automation, Kharkiv, Ukraine.

Filipenko Inna – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Design Automation, Kharkiv, Ukraine.

Korniienko Valentyn – Kharkiv National University of Radio Electronics, PhD student at the Department of Design Automation, Kharkiv, Ukraine.

Rozhnova Tetiana – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Design Automation, Kharkiv, Ukraine.

AUTOMATED DESIGN OF EMBEDDED DIGITAL SIGNAL PROCESSING SYSTEMS ON SoC PLATFORM

The object of the study is the procedures for automated design and analysis of digital signal processing algorithms on the *SoC* technology platform. **The subject of the study** is models, methods and procedures for designing and optimal selection of *SoC* components for the implementation of digital signal processing algorithms for audio spectrum. **The aim of the study** is to develop models and procedures for determining the possibilities of a compromise distribution of signal processing algorithm computations in the cycle of computer-aided design on the *SoC* technology platform in terms of performance and the feasibility of using hardware and software algorithms realization. The article solves the following **tasks**: consideration of the procedures for interacting the processor core with programmable logic as part of system-on-chip systems; development of procedures for computer-aided design and analysis of signal processing systems using programming languages and hardware description languages for the implementation of embedded systems. The following **methods** are being used: implementation of digital signal processing algorithms in the C programming language and high-level synthesis tools for realizing IP blocks, diagnostic experiment by generating test signal patterns, and analysis of the processing results at the system output. **The results achieved.** Based on the analysis of the procedures for the interaction of the processor core and programmable logic on the selected *SoC* platform, a model of the audio spectrum signal processing system is designed. The practical implementation was performed based on the *Vivado/Vitis/Vitis HLS* CAD tool stack. The proposed model was verified using a programmable test signal generator and analyzing the obtained characteristics of digital filters at the system output. **Conclusions.** The article analyzes the principles of designing embedded information processing systems implemented in system-on-chip. The principles of building and analyzing digital signal processing systems based on system-on-chip containing programmable logic and processor parts are considered. The developed methods have been tested on the algorithms of *CIC* and *FIR* filters on the technological platform of *SoC FPGA* of the *ZYNQ-7000* family of *Xilinx* company.

Keywords: embedded systems; systems-on-chip; *FPGA*; C programming language; digital signal processing algorithms; audio signals; digital filters.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Філіпенко І. В., Корнієнко В. Р., Рожнова Т. Г. Автоматизоване проектування вбудованих систем цифрового оброблення сигналів на платформі *SoC*. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 192–203. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.192>

Shkil, A., Rakhlis, D., Filipenko, I., Korniienko, V., Rozhnova, T. (2024), "Automated design of embedded digital signal processing systems on SOC platform", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 192–203. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.192>

Х. МАТКІВСЬКА, О. ЗАЧКО

МОДЕЛІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ СИСТЕМ HR-МЕНЕДЖМЕНТУ БЕЗПЕКО-ОРІЄНТОВАНИХ ОРГАНІЗАЦІЙ

Предметом дослідження в статті є операційні процеси цифровізації HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем в умовах сучасної мінливої ситуації в Україні. **Мета роботи** – дослідити показники ефективної комунікації між працівниками та визначити кількість потенційних каналів зв'язку, а також дослідити автоматизовану комунікацію між особовим складом безпеко-орієнтованих систем. У статті вирішуються такі **завдання**: формування централізованої моделі управління операційними процесами HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем, розкриття потенціалу особового складу в умовах цифровізації кадрових процесів безпеко-орієнтованих систем. **Методи дослідження**. Розроблено та наведено методи реалізації безперервного розвитку безпеко-орієнтованих систем, централізовану модель управління операційними процесами HR-менеджменту цивільного захисту та наскрізний процес автоматизованої HR-комунікації всередині державних структур. Здобуто такі **результати**: визначено кількість потенційних каналів зв'язку, графік кількості зацікавлених сторін, зображено наскрізний процес автоматизованої HR-комунікації всередині державних структур, подано централізовану модель управління операційними процесами HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем, розкрито потенціал особового складу в умовах цифровізації кадрових процесів. **Висновки**. Рушійні сили цифрової трансформації державних структур передбачають задоволення очікувань особового складу, цифрову трансформацію кадрової галузі, цифрові інновації державної служби. Напрями цифрової трансформації HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем містять цифрове робоче місце (онлайн-профіль працівника), цифрові кадрові процеси організації, цифрові послуги та онлайн-самообслуговування особового складу. Серед них цифровий процес управління персоналом здебільшого зосереджений на навчанні та розвитку, відкритій ефективній комунікації всередині державної служби, а також на функціях оцінювання особового складу. Цифрове перетворення ставить певні питання, а саме як паралелізувати та переходити між старою та новою системами HR-менеджменту, як це вплине на продуктивність та цифрову етику держави.

Ключові слова: цифровізація; автоматизована комунікація; державні структури; HR-менеджмент; безпеко-орієнтовані системи.

Вступ

Сучасне суспільство формується під впливом нового середовища, у якому цифрові технології набувають усе більшого значення. Цифрові технології можуть значно підвищити ефективність праці та добробут людей, а також вирішити адміністративні проблеми. Будь-яка зміна матиме вплив на організацію. Цифровізація є одним з основних рушіїв технологічних змін в управлінні людськими ресурсами в державних організаціях, основною метою розвитку яких є виробництво та використання цифрових логічних схем. Дослідження операційних процесів цифровізації HR-менеджменту служби цивільного захисту дасть змогу державним службам упроваджувати реформи в умовах теперішньої мінливої ситуації нашої країни, здійснювати моніторинг особового складу в режимі реального часу, досягати більшої операційної ефективності та покращувати взаємодію для ухвалення зважених рішень без зволікань, а також надавати своїм підлеглим працівникам найрізноманітніші послуги онлайн [1–3].

Аналіз проблеми та наявних методів

Нині проблеми з цифровізацією операційних процесів систем управління персоналом полягають у відсутності автоматизованих програм управління персоналом для державних установ, у нестачі ресурсів і відсутності автоматизованої комунікації між особовим складом безпеко-орієнтованих систем.

Відсутність оцифрування HR-процесів служби цивільного захисту призводить до того, що всередині безпеко-орієнтованих систем немає відповідної суттєвої підтримки та доступу до інформації про проходження служби особовим складом, що необхідно для прийняття рішень. Цифрове управління персоналом – це можливість постійного зворотного зв'язку, що показує ступінь досягнення поставлених цілей. Упровадження сучасних платформ електронного навчання може стати значною підтримкою для роботи державних структур [4].

У працях О. Зачка розглянуто важливу науково-прикладну проблему створення методологічних основ безпечно-орієнтованого управління проектами розвитку

складних організаційно-технічних систем. Автор запропонував концептуальний підхід для безпечно-орієнтованого управління проектами розроблення складних систем. Створено системну модель віртуального проєктного середовища складного інфраструктурного проєкту та реалізовано методологічний підхід до планування безпеки проєкту на концептуальній стадії життєвого циклу. Також запропоновано підхід до розроблення моделі життєвого циклу продукту проєкту розвитку інфраструктури складної організаційно-технічної системи, яка передбачає формалізацію всіх важливих процесів управління [5, 6, 8]. У своїй роботі Д. Лисенко розробляє методологію організації проєктних команд, використовуючи теорію прецедентів у процесі прийняття рішень щодо формування команди для досягнення визначених цілей проєкту. Удосконалити практику найму, щоб переконатися, що в командах проєкту працюють співробітники з потрібними навичками та досвідом. Моделі якості отримують подальший розвиток і можуть покращити якість підготовлених команд. Досягнуті наукові результати можуть стати основою для розроблення комплексних методологій побудови баз даних державних адміністрацій [9]. У наукових працях О. Новікова аналізує перспективи змін у трудовому житті в контексті цифровізації. Аналіз проводився за двома сценаріями розвитку України: повільним і цільовим. Об'єктом дослідження є сфера праці зі специфічною системою соціально-трудових відносин, що змінюється в умовах цифрової трансформації. За результатами дослідження автор визначає систему причин і наслідків впливу цифровізації на ринок праці, що дає змогу змодельовати систему соціально-економічних ризиків, яка формується внаслідок цифровізації економіки. Запропоновано використання науково-методичного підходу на основі концепції ПАТ-аналізу. Це допомагає оцінювати соціальні ризики навіть у разі зміни вихідних показників. Зміни на ринку праці під час цифрової трансформації визначено з використанням інерційних та цільових сценаріїв економічного розвитку України. За результатами аналізу очікується збереження низького рівня економічного розвитку та застарілості технологічної структури галузі (інерційний сценарій), а також послаблення появи окремих соціальних ризиків. Така перспектива розвитку спричиняє погіршення всієї економічної системи, зниження конкурентоспроможності країни і, як наслідок, зниження матеріального добробуту населення [12, 13].

У наукових працях Л. Сабадоша подані наукові та прикладні проблеми розроблення ефективних методів управління персоналом проєктів і програм. Проблематика полягала у формуванні проєктних команд із певними обмеженнями, у реалізації проєктів і програм для співробітників, використанні комплексного підходу до формування проєктних команд для створення адаптивних проєктних команд, компетентнісно орієнтованих проєктних команд. Проблему вирішено шляхом побудови матриці та розроблення методології, заміни наявної ролі. Цей метод сприяє більш ефективному управлінню проєктами, оскільки визначає склад трудових ресурсів у певному діапазоні. Зростає інтерес до формування цифрової трансформації таким чином, щоб поважати основні права й демократичні цінності та мати користь для суспільства загалом. Зараз прийнято говорити про європейський підхід до цифровізації: які дані та технології потрібно використовувати для ефективної економіки та добробуту суспільства [14]. У своїх працях Л. Шостак досліджує та узагальнює теоретичні положення та аналітичну інформацію щодо оцінки рівня потенціалу цифровізації бізнес-середовища та застосовує методи логічного узагальнення, аналізу, порівняння та синтезу для оцінювання потенціалу цифровізації бізнес-середовища. Результати дослідження свідчать про необхідність прискореного розвитку вітчизняної цифрової економіки, а рівень перспективи цифровізації потенціалу бізнес-середовища має середній показник, якому властиві значні резерви до зростання [15].

Мета статті – дослідити показники ефективної комунікації між працівниками та визначити кількість потенційних каналів зв'язку, а також проаналізувати автоматизовану комунікацію між особовим складом безпеко-орієнтованих систем.

Вирішення завдання

В умовах загрози життю та невизначеності комунікація HR-фахівців служби цивільного захисту із особовим складом ускладнюється тим фактом, що їм не просто потрібно впоратися із собою та із прийняттям ситуації, яка зараз в Україні, але й виконати всю додаткову роботу, що виникає під час воєнного стану, зокрема підтримати свою команду, особовий склад, який очікує на співчуття, розуміння, чітке та прозоре спілкування, здійснювати пошук і надання особистої інформації про особовий склад,

приймати швидкі рішення та виявляти оперативність у розв'язанні проблем, що виникають унаслідок війни. Частина особового складу втратила роботу через вторгнення російських окупантів на нашу землю, це здебільшого стосується жінок атестованого

складу, які виїжджали із дітьми до інших країн з окупованих територій та із зон, де ведуться активні бойові дії, частина особового складу працює в особливих умовах, частина – віддалено (рис. 1).

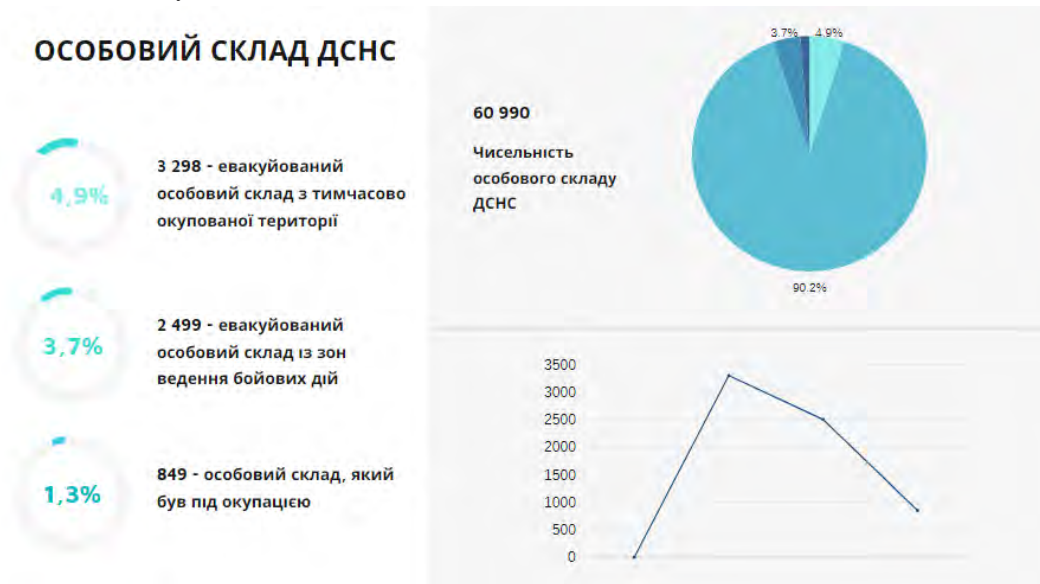


Рис. 1. Інфографіка евакуйованого особового складу із зон проведення бойових дій

Необхідний послідовний перехід від рутинних повторювальних кадрових дій до автоматизованої комунікації всередині державної служби, що базуються на стандартизації та спрощенні внутрішніх операційних процесів HR-менеджменту. Такий перехід можливий саме завдяки цифровій трансформації. Вона надає переваги, що виходять далеко за межі простого підвищення стійкості до кризових умов, як країні загалом, так і її державним службовцям, компаніям та сектору державного управління [7].

Цифровізація збільшить адаптивність і ступінь впливу держави в мінливому середовищі країни. Цифрова трансформація операційних процесів HR-менеджменту покращить цілісне управління державою, зосереджуючись на формуванні доступності особистої інформації особового складу та можливості онлайн-послуг для них (рис. 2). Цифрові інструменти дають змогу державним службам залишатися на зв'язку з особовим складом та отримувати зворотний зв'язок від них.



Рис. 2. Централізована модель управління операційними процесами HR-менеджменту цивільного захисту

Ефективність і прозорість безпеко-орієнтованих систем значно залежать від спроможності та залученості свого персоналу. Отже, державним структурам час залучати, розвивати й утримувати персонал із потужними цифровими компетенціями. Робоча сила майбутнього очікує на інтерактивні технології, що покращують користувацький досвід, на прогнозні технології для вирішення численних повсякденних завдань, а також на кар'єрну структуру,

яка дає змогу брати на себе відповідальність за результати й забезпечує особистісний розвиток.

Цифровізація кадрових процесів служби цивільного захисту допоможе виявляти, наймати, утримувати, навчати та просувати найбільш залучених працівників із можливостями швидкого підвищення перспективних кадрів. Вона також дасть змогу розкрити потенціал особового складу для досягнення кращих результатів (рис. 3) [10, 11].



Рис. 3. Розкритий потенціал особового складу в умовах цифровізації кадрових процесів служби цивільного захисту

Одним із показників ефективної комунікації між працівниками є кількість потенційних каналів зв'язку. На жаль, ми ніколи не можемо припустити, що повідомлення або дзвінок буде отримано та витлумачено, як задумано. Багато факторів можуть створити проблеми й помилки в роботі та порушити спілкування. Ці фактори часто називають "шумом" і можуть передбачати такі елементи, як особисті упередження між особовим складом, складність у поясненні своєї проблеми з боку підлеглого особового складу. Що більше каналів, то вищі шанси для "шуму" спричинити непорозуміння. Непорозуміння – поширена проблема в управлінні людськими ресурсами, що може вплинути на такі елементи роботи, як терміни та якість виконання роботи. Комунікація між особовим складом ускладнюється кількістю учасників. Якщо більше людей залучається, то неправильне спілкування стає ймовірнішою проблемою. Кількість потенційних каналів зв'язку зростає зі збільшенням кількості людей, які беруть участь у проєкті, оскільки ми можемо з упевненістю припустити, що кожна

людина здатна спілкуватися з будь-якою іншою особою. Наприклад, якщо в комунікації беруть участь лише дві людини, є лише один потенційний канал зв'язку (рис. 4).



Рис. 4

Але якщо в проєкті беруть участь чотири людини, кількість потенційних каналів зв'язку зростає до шести (рис. 5).

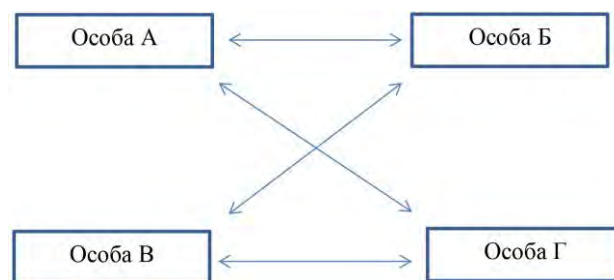


Рис. 5

Щоб планувати всі можливі канали зв'язку для більш ефективної комунікації, можна використовувати просту формулу для розрахунку кількості каналів зв'язку [18]. Формула для розрахунку кількості потенційних каналів зв'язку:

$$Z = \eta \times (\eta - 1) / 2 . \quad (1)$$

У цій формулі η означає кількість зацікавлених сторін. Зацікавлена сторона – це може бути будь-яка особа, група чи організація, що є частиною державної служби. Знання кількості зацікавлених сторін дає змогу використовувати цю формулу для розрахунку того, наскільки складними можуть бути *HR*-комунікації всередині служби цивільного захисту та допомагає побачити, як багато часу витрачають підрозділи з управління персоналом на повторювальні рутинні процеси для *HR*-комунікації з особовим складом. Наприклад, з п'ятьма зацікавленими сторонами

для вирішення кадрових питань є десять можливих каналів зв'язку, а з 20 зацікавленими сторонами є 190 можливих каналів комунікації між *HR*-менеджерами та особовим складом.

Ця формула бере до уваги можливість будь-якої окремої зацікавленої сторони гіпотетично спілкуватися з будь-якою іншою зацікавленою стороною. Як видно з лінійного графіка (рис. 6), це може привести до швидкого зростання кількості потенційних каналів зв'язку зі збільшенням кількості зацікавлених сторін. З такою кількістю можливих каналів зв'язку зростає ймовірність того, що деє виникнуть механічні помилки в роботі, непорозуміння між особовим складом і *HR*-менеджерами, збільшення використання робочого часу на комунікацію з особовим складом та надання особистої інформації про них.

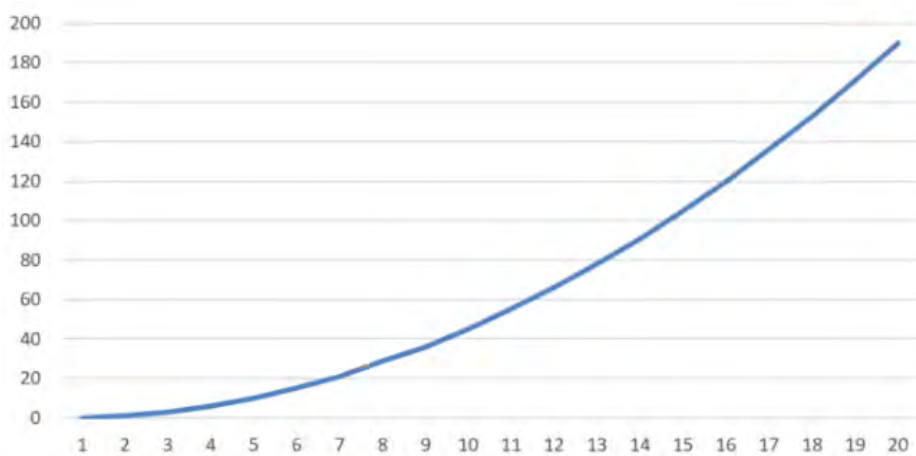


Рис. 6. Лінійний графік кількості зацікавлених сторін та кількості потенційних каналів зв'язку

В умовах військового стану безпека, здоров'я та добробут працівників виявилися актуальними питаннями багатьох організацій. Належна робота та взаємодія менеджерів з персоналу з працівниками забезпечує ефективність, що зрештою є динамічним показником результативності праці. Прийняття орієнтованої стратегії управління інформацією на особовий склад з багатоканальними можливостями їхнього залучення матиме значну вигоду для державних секторів, що піддаються кількісному оцінюванню. Автоматизована комунікація містить певні критичні функції для її масштабованості та розширення за допомогою сучасних технологій: управління інформацією (запитами від особового складу, реєстрами), управління згодами, вбудовані маркетингові інструменти для надання проактивних і комплексних послуг особовому складу.

Різноманітність послуг у сфері державної служби цивільного захисту: від суто інформативних сервісів, що дають особовому складу уявлення про проходження служби, до комплексних послуг, наприклад звернення за довідкою з місця роботи, обчислення вислуги років чи підписання електронної версії контракту про проходження служби цивільного захисту. З метою здійснення автоматизованої комунікації між кадровим персоналом та особовим складом щодо організації та надання рівних і доступних послуг для всіх працівників служби цивільного захисту, незалежно від категорії посади, доцільно впровадити цифрову платформу для їх залучення, яка допомагає отримувати та надавати інформацію завдяки доступній цифровій платформі, щоб гарантувати оптимальну турботу про свій особовий склад (рис. 7) [16].

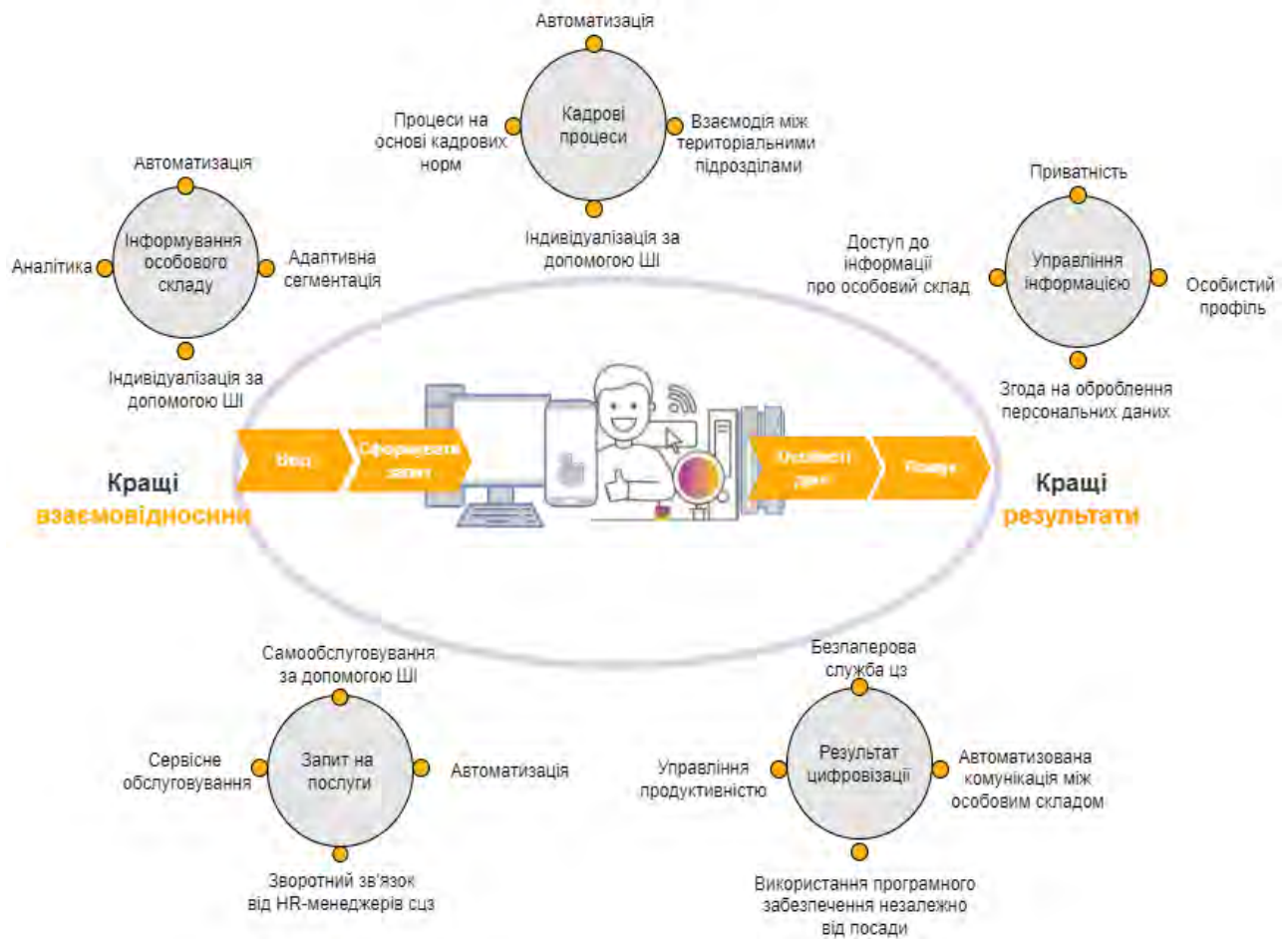


Рис. 7. Наскрізний процес автоматизованої HR-комунікації всередині державних структур

З розвитком держави та технологій, що допомагають інтегрувати складні організаційні структури державних секторів у єдину цифрову мережу, цифрові платформи для самообслуговування особового складу стануть одним із найпопулярніших підходів витрат і підвищення внутрішніх процесів державних органів (рис. 8). Вони зменшують адміністративне навантаження та пришвидшують роботу завдяки усуненню повторювальних HR-процесів і стандартизації певних функцій, таких як нарахування заробітної плати та вислуги років, управління персоналом. Завдяки такій упорядкованій структурі для виконання відповідних завдань потрібно удвічі менше державних ресурсів. Більшість транзакцій може здійснюватися з допомогою порталу самообслуговування, доступного для всього особового складу служби цивільного захисту [17].

У межах усебічного управління кадровою інформацією безпеко-орієнтованих систем кадрові

служби державних секторів розуміють цінність і доцільність використання програмного забезпечення та є стратегічною основою щодо реалізації безперервного розвитку державної служби, які продемонстровані у трьох функціональних блоках менеджменту, що мають важливе значення в процесі ухвалення рішень (рис. 9).

Державне управління персоналом безпеко-орієнтованих систем має забезпечувати швидке та легке використання кадрової інформації особовим складом без ручного втручання представників кадрової служби державних структур. Додаткова модернізація базових кадрових процесів скорочує час оброблення інформації, надає інші переваги, наприклад, підвищує продуктивність виконання аналізу щодо роботи з великим обсягом даних. Аналітика інформації дає змогу зменшити кількість рутинної роботи та зосередитися на критично важливих процесах або прискорити HR-процеси, з'єднуючи всі кадрові дії територіальних підрозділів [19].



Рис. 8. Модель 1 державного сектору, що є стратегічною основою в реалізації безперервного розвитку державної служби



Рис. 9. Модель 2 державного сектору, що є стратегічною основою в реалізації безперервного розвитку державної служби

Висновки

Створення цифрової онлайн-платформи вимагає цілісного підходу до кадрових HR-процесів служби цивільного захисту: використання інформації для фіксації та розуміння потреб і бажань особового складу; застосування ефективних комунікацій для активного залучення особового складу до кадрових процесів усередині служби; розуміння бажаних для особового складу каналів залучення; забезпечення безперешкодних переходів між каналами та, зрештою, досягнення більшої задоволеності взаємодії між особовим складом.

Досліджено операційні процеси цифровізації HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем і проаналізовано рушійні сили цифрової трансформації державних структур для працівників кадрових служб державних структур та особового складу служби цивільного захисту, що допоможе їм зрозуміти основні причини цифрової трансформації HR-менеджменту. Як наслідок, керівникам кадрового органу державних структур необхідно переглянути можливість або терміновість цифрової трансформації HR-менеджменту в контексті внутрішнього та зовнішнього організаційного середовища. HR-менеджмент служби цивільного захисту відповідає внутрішнім вимогам особового складу (наприклад, забезпечення цифрових процесів HR-менеджменту), а також зовнішнім факторам, таким як розвиток особового складу та державне регулювання. Для задоволення внутрішніх і зовнішніх вимог проаналізовано цифрову трансформацію для оновлення HR-менеджменту служби цивільного захисту та навчання фахівців-управлінців безпеко-орієнтованих систем. До рушійних сил трансформації HR-менеджменту служби безпеко-орієнтованих систем автори розглянули й дослідили напрям зміни державної служби, тобто, у якій сфері кадрова служба має трансформуватись, розробили централізовану модель управління операційними процесами HR-менеджменту, наскрізний процес

автоматизованої HR-комунікації всередині державних структур, розробили модулі державного сектору щодо реалізації безперервного розвитку державної служби. Це допоможе зосередити увагу на ключі цифрової трансформації HR-менеджменту, щоб не відхилятися від основних напрямів кадрової служби. Автори аналізують елементи цифрової трансформації з погляду HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем, зокрема формування цифрового робочого профілю для особового складу, надання внутрішніх цифрових послуг і цифрових HR-процесів.

Досліджено та продемонстровано, як управління людськими ресурсами можна трансформувати в цифровому плані в контексті цифровізації держави. Рушійні сили цифрової трансформації державних структур передбачають задоволення очікувань особового складу, цифрову трансформацію кадрової галузі, цифрові інновації державної служби. Напрями цифрової трансформації HR-менеджменту безпеко-орієнтованих систем містять цифрове робоче місце (онлайн-профіль працівника), цифрові кадрові процеси організації, цифрові послуги та онлайн-самообслуговування особового складу. Серед них цифровий процес управління персоналом здебільшого зосереджений на навчанні та розвитку, відкритій ефективній комунікації всередині державної служби, а також на функціях оцінювання особового складу. Цифрове перетворення ставить певні питання, а саме: як паралелізувати та переходити між старою та новою системами HR-менеджменту, як це вплине на продуктивність та цифрову етику держави.

Запровадження єдиної стратегічної політики щодо розроблення та використання особовим складом інформації модернізує та прискорює процеси ухвалення рішень в інших сферах державної структури. Отже, усе згадане вище демонструє цінність цифрових технологій у запровадженні автоматизованої комунікації для досягнення пріоритетів державних служб – стати доступними для особового складу й бути більш ефективними та інноваційними.

Список літератури

1. Антонюк В.П. Залученість населення України в процеси цифровізації. *Побудова інформаційного суспільства: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф.*, Київ, 19–20 верес. 2019 р. Київ, 2019. С. 13–18. URL: <http://www.uinte.kiev.ua/sites/default/files/antonjuk.pdf>
2. Василів В.Б. Інформаційні системи менеджменту персоналу. Рівне, 2014. 148 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/6010/1/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%86%D0%A1%20%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B6%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%83>

- %20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%96%D0%B2.pdf
3. Ведерніков М.Д., Базалійська Н.П. Інноваційні технології управління персоналом промислового підприємства. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2018. № 3. С. 72–78. URL: http://www.econom.stateandregions.zp.ua/journal/2018/3_2018/13.pdf
 4. Головань Д.В. Застосування сучасних автоматизованих систем управління персоналом на підприємстві. *Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі: проблеми теорії та практики*. Харків, 2013. № 1 (21). С. 2–7. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eupmg_2013_1_9
 5. Зачко О.Б. Формування проектних команд в системі цивільного захисту на основі тимчасових віртуальних структур. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. Львів, 2013. № 7. С. 87–91. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/728>
 6. Зачко О.Б. Теоретичні підходи до управління безпекою в проектах розвитку. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2015. Вип. 22. С. 48–53. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/1064>
 7. Захарнич Г.М., Любомудрова Н.П., Панас Я.В. Основні аспекти управління знаннями в сучасних умовах. *Підприємництво та інновації*. 2020. С. 108–112. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/12.18>.
 8. Ковальчук О.І., Кобилкін Д.С., Зачко О.Б. Діджиталізація процесів управління персоналом проектно-орієнтованих організацій у сфері безпеки. *ІТМ*. 2022. С. 183 – 195. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-57-120>
 9. Лисенко Д.Е. Оптимізаційні моделі планування виробництва з урахуванням невизначеності. *Системи управління, навігації та зв'язку: збірник наукових праць*. Одеса, 2017. 2 (42). С. 167–170.
 10. Лісова Р.М. Цифрові платформи як інструмент діджиталізації економічної системи. *Інноваційні рішення в сучасній науці, освіті та практиці: матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (наукове видання)*, 17–18 листопада 2020 р. Київ: НТУ, 2020. Ч. 1. С. 208–210.
 11. Мартиненко В.М., Древаль Ю.Д., Конотопцева Ю.В. Сучасна технологія оцінювання персоналу та кадрового потенціалу організації і її соціально-психологічний аспект: наук. розробка. Київ: НАДУ, 2013. 52 с. URL: https://mmgh.kname.edu.ua/images/Gayduchenko/Gaydu_1.pdf
 12. Новікова О.О. Інформаційна технологія підтримки прийняття кадрових рішень для закладів вищої освіти України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.13.22. Харків, 2019. С. 58–71. URL: https://library.znu.edu.ua/newbook/index.php?action=url/view&url_id=74109
 13. Новікова О.Ф., Шамілева Л.Л., Хандій О.О. Оцінка стану змін у трудовій сфері та забезпечення якості трудового життя за умов цифровізації економіки. *Економічний вісник Донбасу*. 2021. № 3 (65). С. 187–199. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2021-3\(65\)-191-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2021-3(65)-191-205)
 14. Сабадош Л.Ю. Методи управління забезпеченням людськими ресурсами проектів та програм за компетентнісним підходом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.22. Харків, 2014. 21 с. URL: <http://www.disslib.org/metody-upravlinnja-zabezpechennjam-ljudskymu-resursamy-proektiv-ta-prohram-za.html>
 15. Шостак Л.В., Більо І.В., Микитюк Є.Л. Потенціал цифровізації вітчизняного бізнес-середовища. *Економічний аналіз*. 2021. Т. 31. № 1. С. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2021.01.245>
 16. Daniel Mueller, Stefan Strohmeier, Christian Gasper. HRIS Design Characteristics: Towards a General Research Frame-work. *Proceedings of the Third European Academic Workshop on electronic Human Resource Management*, Bamberg, Germany, 2010. ISSN 1613-0073. P. 250–267. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-570/paper015.pdf>
 17. Dorel Dusmanescu, Aleksandra Bradic-Martinovic. The Role of Labour Markets and Human Capital in the Unstable Environment. The role of information systems in human resource management. *Research monograph*. 2011. Chapter 2, P. 25–45. URL: https://www.researchgate.net/publication/228279666_The_Role_of_Labour_Markets_and_Human_Capital_in_the_Unstable_Environment
 18. Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Sixth Edition. Project Management Institute. 2017. 496 p.
 19. Marie Christine M. Banaria, Erica Joi W. Ang, Wardylene P. Majan, Giuseppe Ng. Developing a Human Resource Information System through Hybrid Software Engineering Model. *University of Asia and the Pacific, Conference: Make SENs Research Colloquium*. 2018. P. 2–7. URL : <https://www.researchgate.net/publication/327061977>

References

1. Antoniuk, V. (2019), "Involvement of the population of Ukraine in the processes of digitalization". ["Zaluchenict naseleennja Ukrainy v procesy cyfrovizacii"], *Building an information society: materials of the International scientific and practical conference*, Kyiv, September 19-20. P. 13-18. available at: <http://www.uintai.kiev.ua/sites/default/files/antonyuk.pdf>
2. Vasylyiv, V. (2014), "Information systems of personnel management: a textbook". ["Informaciini systemy menedzmentu personaly"], Rivne: NUWHP. 148 p. available at: <https://ep3.nuwm.edu.ua/6010/1/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%86>

- %D0%A1%20%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B6%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%83%20%D0%BF%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%83%20%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%96%D0%B2.pdf
3. Vedernikov, M., Bazaliyska, P. (2018), "Innovative technologies of personnel management of an industrial enterprise". ["Innovaciini tehnologii upravlinnja personalom promyslovoho pidprijemstva"], *State and regions. Series: Economics and entrepreneurship*. № 3. P. 72–78. available at: http://www.econom.stateandregions.zp.ua/journal/2018/3_2018/13.pdf
 4. Golovan, D. (2013), "Application of modern automated personnel management systems at the enterprise". ["Zastosuvannja suchasnyh avtomatyzovanyh system upravlinnja personalom na pidprijemstvi"], *Economics and management of machine-building enterprises: problems of theory and practice*. Kharkiv. № 1 (21). P. 2–7. available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eupmg_2013_1_9
 5. Zachko, O. (2013), "Formation of project teams in the system of civil protection on the basis of temporary virtual structures". ["Formuvannja proektnuh komand v systemi cyvilnoho zahystu na osnovi virtualnyh struktur"], *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*. Lviv. № 7. P. 87–91. available at: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/728>
 6. Zachko, O. (2015), "Theoretical approaches to security management in development projects". ["Teoretychni pidhody do upravlinnja bezpekojy v proektah rozvytku"], *Development management of complex systems*. Kyiv. Issue 22. P. 48–53. available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/1064>
 7. Zakharnych, H., Liubomudrova, N., Panas Y. (2020), "The main aspects of knowledge management in modern conditions". ["Osnovni aspekty upravlinnja znannjamy v suchasnyh umovah"], *Entrepreneurship and innovation*. P. 108-112. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/12.18>
 8. Kovalchuk, O., Kobylykin, D., Zachko, O. (2022), "Digitalization of personnel management processes of project-oriented organizations in the field of security". ["Dydjitalizacija procesiv upravlinnja personalom proektno-orijentovanyh organizacij u sferi bezpeky"], *ITPM*. P. 183–195. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-57-120>
 9. Lysenko, D. (2017), "Optimization models of production planning with regard to uncertainty". ["Optyimizacija modeli planuvannja vyrobnuctva z urahuvannjam nevyznachenosti"], *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*. Odesa. 2 (42). P. 167–170.
 10. Lisova, R. (2020), "Digital platforms as a tool for digitalization of the economic system". ["Cyfrovi platform jak instrument dudjitalizaciji krajiny"], *Innovative solutions in modern science, education and practice: Proceedings of the First International Scientific and Practical Internet Conference (Scientific publication)*. Chapter 1. P. 208–210.
 11. Martynenko, V., Dreval, Y., Konoptseva, Y. (2013), "Modern technology of personnel and human resources assessment of the organization and its socio-psychological aspect". ["Suchasna tehnologija ocinjuvannja personal ta kadrovoho potencialu i socialno-psyhologichni aspekt"], *Scientific development*. K.: NADU, 52 p. available at: https://mmgh.kname.edu.ua/images/Gayduchenko/Gaydu_1.pdf
 12. Novikova, O. (2019), "Information technology to support personnel decision-making for higher education institutions of Ukraine", ["Informaciina tehnologija pidtrymky pryinjattja kadrovih rashen dlja zakladiv vyshchoi osvity Ukrainy"], PhD thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.13.22. Kharkiv. P. 58-71. available at: https://library.znu.edu.ua/newbook/index.php?action=url/view&url_id=74109
 13. Novikova, O., Shamileva, L., Handiy, O. (2021), "Assessment of the state of changes in the labor sphere and ensuring the quality of labor life in the conditions of digitalization of the economy". [Ocinka stanu zmin u trudovii sferi ta zabezpechennja jakosti trudovoho jyttja"], *Economic Bulletin of Donbas*. № 3 (65). P. 187–199. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2021-3\(65\)-191-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2021-3(65)-191-205)
 14. Sabadosh, L. (2014), "Methods of managing the provision of human resources for projects and programs by competence approach". ["Metody upravlinnja zabezpechennja ljudskymy resursamy proektiv ta program za kompetentnisnym pidhodom"], PhD thesis: 05.13.22. Kharkiv. 21 p. available at: <http://www.disslib.org/metody-upravlinnja-zabezpechennjam-ljudskymy-resursamy-proektiv-ta-prohram-za.html>
 15. Shostak, L., Bilyo, I., Mykytyuk, E. (2021), "Potential of digitalization of the domestic business environment". ["Potencial cyfrovizaciji vitchyznjanoho biznes-seredovyshcha"], *Economic analysis*. Vol. 31, No. 1. P. 245–251. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2021.01.245>
 16. Mueller, D., Strohmeier, S., Gasper, Ch. (2010), "HRIS Design Characteristics: Towards a General Research Framework". *Proceedings of the Third European Academic Workshop on electronic Human Resource Management*, Bamberg, Germany. ISSN 1613-0073. P. 250–267. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-570/paper015.pdf>
 17. Dusmanescu, D., Bradic-Martinovic, A. (2011), "The Role of Labour Markets and Human Capital in the Unstable Environment. The role of information systems in human resource management", *Research monograph*. Chapter 2, P. 25–45.
 18. Guide to the Project Management Body of Knowledge. (2017), (PMBOK® Guide). Sixth Edition. Project Management Institute. 496 p.

19. Marie Christine, M., Joi, W., Wardylene, P. (2018), "Developing a Human Resource Information System through Hybrid Software Engineering Model". *University of Asia and the Pacific, Conference: Make SENs Research Colloquium*. P. 2–7. available at: <https://www.researchgate.net/publication/327061977>

Надійшла 23.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Матківська Христина Степанівна – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ад'юнкт денної форми навчання ад'юнктури, докторнатури, Львів, Україна; e-mail: matkivskahrystyna@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-6044-2387>

Зачко Олег Богданович – доктор технічних наук, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри права та менеджменту у сфері цивільного захисту, Заслужений діяч науки і техніки України, Львів, Україна; e-mail: zachko@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3208-9826>

Matkivska Khrystyna – Lviv State University of Life Safety, adjunct full-time education, Lviv, Ukraine.

Zachko Oleh – Doctor of Technical Sciences, Lviv State University of Life Safety, Professor at the Department of Law and Management in the Field of Civil Protection, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Lviv, Ukraine.

MODELS OF DIGITALIZATION OF HR MANAGEMENT SYSTEMS IN SECURITY-ORIENTED ORGANIZATIONS

The **subject matter** of the article is the study of operational processes of digitalization of HR-management of security-oriented systems in the current changing situation of our country. The **goal** of the work is to study the indicators of effective communication between employees and determine the number of potential communication channels, as well as to study automated communication between the personnel of security-oriented systems. The following **tasks**: formation of a centralized model for managing the operational processes of HR management of security-oriented systems, unlocking the potential of personnel in the digitalization of personnel processes of security-oriented systems. The **methods** are used: methods for implementing the continuous development of security-oriented systems, a centralized model for managing the operational processes of HR management of civil protection and an end-to-end process of automated HR communication within government agencies are developed and presented. The following **results**: determination of the number of potential communication channels, a graph of the number of stakeholders, a picture of the end-to-end process of automated HR communication within government agencies, a centralized model for managing HR operational processes of security-oriented systems, and the potential of personnel in the digitalization of HR processes. **Conclusions**: the driving forces behind the digital transformation of government agencies include meeting the expectations of the staff, digital transformation of the HR industry, and digital innovations in the civil service. Areas of digital transformation of HR management in security-oriented systems include a digital workplace (online employee profile), digital HR processes of the organization, digital services and online self-service of personnel. Among them, the digital HR process mainly focuses on training and development, open and effective communication within the civil service, and personnel evaluation functions. The digital transformation will lead to certain consequences, such as parallelization and transition between the old and new HR management systems, and will affect the productivity and digital ethics of the state.

Keywords: digitalization; automated communication; government agencies; HR management; security-oriented systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Матківська Х. С., Зачко О. Б. Моделі цифровізації систем HR-менеджменту безпеко-орієнтованих організацій. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.204>

Matkivska, K., Zachko, O (2024), "Models of digitalization of hr management systems in security-oriented organizations", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 204–214. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.204>

О. ЧЕРНЯК, І. БАГАЄВ, О. КАТРИЧ, О. ТЕСЛОВ, О. КОСИЧЕНКО, В. ШЕВЧЕНКО

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ ПЕРІОДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ІНДЕКСІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ КРАЇН ЄС МЕТОДАМИ ПОРЯДКОВИХ СТАТИСТИК

Предметом дослідження є процес оцінювання індексів сталого розвитку країн Європейського Союзу. **Мета роботи** – розроблення методики визначення мінімальної кількості періодів, за які необхідно й достатньо оцінювати індекси сталого розвитку держав. У статті визначено такі **завдання**: розроблення методики визначення закону розподілу випадкових величин індексів сталого розвитку; установлення мінімальної кількості періодів для оцінювання індексів сталого розвитку країн ЄС. Використовуються **методи** параметричних і порядкових статистик. **Досягнуті результати**. Розглянуто параметричні та непараметричні методи статистики, їх переваги та недоліки. Проаналізовано методи оцінювання функції розподілу за малими вибірками, зокрема методи прямокутних вкладів і зменшення невизначеності. Приділено особливу увагу проблемі зміни закону розсіювання показників якості в разі зміни умов технології. Запропоновано графоаналітичний метод ідентифікації закону розподілу випадкових величин за малою кількістю статистичної інформації. Для цього застосовували теорії порядкових статистик. Розроблено покрокову методику ідентифікації закону розподілу випадкових величин із використанням десяти впорядкованих значень. Запропоновано математичні сподівання порядкових статистик для трьох законів розподілу. Розроблено методику визначення кількості періодів для оцінювання індексів сталого розвитку країн з використанням порядкових статистик. Дослідження ґрунтується на аналізі статистичних показників за останні десять років і впорядкуванні їх за зростанням. Для вибору відповідних законів розподілу застосовано математичні сподівання порядкових статистик. З огляду на обмеженість інформації під час роботи з малими вибірками запропоновано методику, що дає змогу отримати максимальну кількість відомостей з доступної інформації. Розроблений підхід дозволяє брати до уваги невизначеність явища, що вивчається, і приймати обґрунтовані рішення на основі статистичного аналізу. **Висновки**. На підставі знання закону розподілу запропоновано методику визначення мінімальної кількості періодів оцінювання індексів сталого розвитку країн Європейського Союзу. Апробація методики на реальних чисельних відомостях підтвердила, що мінімальна кількість періодів дорівнює семи за умови, що закон розподілу відповідає нормальному закону.

Ключові слова: закон розподілу; кількість періодів оцінювання; статистична інформація; ідентифікація; математичне сподівання; порядкові статистики; дисперсія; індекси сталого розвитку.

Вступ

Для забезпечення прогресу в розвитку людства, зважаючи на потреби населення, необхідно встановлювати цілі, що охоплюють соціальні перспективи, економічний розвиток і відповідальне ставлення до довкілля. Зазначені три напрями містяться в стандартах, які розробляються, і на глобальному рівні втілені в Цілях сталого розвитку (ЦСР), спрямованих на подолання бідності, збереження екології та поліпшення життя й перспектив кожної людини в суспільстві. У ЦСР, прийнятих країнами-членами ООН 2015 р. на період до 2030 р., визначено підвищення якості життя людей, зокрема поліпшення їх здоров'я, розширення доступу до інтернету, покращення житлових умов та інші позитивні критерії.

Одним із ключових аспектів для досягнення ЦСР є фінансування проєктів і програм. Країни мають збільшити свої інвестиції в розвиток,

зосереджуючись на чутливих регіонах та вразливих групах населення. Для цього важливо пропонувати новаторські фінансові механізми, залучати приватний сектор і сприяти партнерству з міжнародними фінансовими установами. Також важливим кроком є покращення ефективності використання ресурсів. Необхідно впроваджувати енергоефективні технології, зменшувати викиди парникових газів, розвивати використання відновлюваних джерел енергії та дотримуватися збалансованого підходу до використання природних ресурсів.

Водночас для оцінювання прогресу в досягненні цілей та ефективності впровадження стратегій сталого розвитку, фінансових та економічних механізмів, соціальних проєктів і програм необхідно мати показники та кваліметричні методи для оцінювання змін. Кваліметричні методи мають брати до уваги різноманіття індикаторів і бути універсальними засобами для оцінювання загального рівня змін щодо досягнення ЦСР.

Важливим завданням є визначення оптимальної кількості статистичної інформації. У соціально-економічних системах, до яких належать ЦСР, статистичною інформацією є числові значення індексів сталого розвитку (ІСР) протягом певного часу, за який існують спостереження. Оскільки країни публікують індекси сталого розвитку щорічно, то важливо знайти мінімальний період (кількість років), за який необхідно брати статистичні числові значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [1–4] розглядаються кваліметричні методи отримання оцінок у досягненні ЦСР. У студіях [1–3] автори використовують статистичну інформацію з відкритих джерел для побудови загальної системи оцінювання ІСР та розробляють модель оцінювання прогресу в досягненні ЦСР для міст різного розміру, порівнюючи їх стабільність за різних умов. Учені пропонують статистичні методи, основані на дослідженні ІСР на рівні міст у Китаї, що можуть бути застосовані в інших країнах з відповідними обмеженнями. Зі свого боку, автори роботи [4] розробили методологію оцінювання стабільності промислового водного циклу, основу на розрахунку індикаторів та індексів з метою створення простого й ефективного інструменту для оцінювання якості водних ресурсів.

Дослідники [5, 6] запропонували метод оцінювання сталого розвитку, що ґрунтується на розробленій моделі зрілості окремих громад або регіонів. Цей метод містить систему, основу на аналізуванні територіального контексту, оцінюванні зрілості та застосуванні тематичного дослідження. Оцінюванню підлягають плани, програми та ініціативи, необхідні для визначення цілей і стратегій покращення, охоплюючи всі аспекти сталого розвитку. Це дає змогу управляти сталим розвитком на місцевому рівні, а громадам визначати стратегії сталого розвитку, де оцінка зрілості відіграє ключову роль, поєднуючи нинішню ситуацію з покращенням у майбутньому. Запропоновану модель можна використовувати як інструмент самооцінювання, дорожню карту для вдосконалення поведінки у сфері сталого розвитку, а також як інструмент бенчмаркінгу для оцінювання та порівняння стандартів і найкращих практик серед організацій та ланцюгів постачання.

Автори [7–10] досліджують питання розроблення кваліметричних підходів до оцінювання об'єктів різної природи. Вони запропонували методи кваліметричного оцінювання якості виробничих та освітніх процесів, ризиків отримання продукції низької якості на виробництві за допомогою функції щільності ймовірності випадкової величини.

Кваліметричні методи – це математичний апарат, тісно пов'язаний із теоріями ймовірностей та математичної статистики. З їх розвитком кваліметричні методи набули широкого застосування в розв'язанні різних прикладних задач незалежно від галузі економіки та сфери діяльності людини. Розв'язання будь-яких задач кваліметричними методами можливе з допомогою двох груп методів – параметричних і непараметричних статистик. Водночас не можна однозначно віддати перевагу одній із груп методів, тому що кожна має переваги й недоліки та залежать здебільшого від кількості наявної статистичної інформації.

Непараметричні статистики не вимагають знання закону розподілу досліджуваної випадкової величини, а використовують тільки вибіркові значення з генеральної сукупності наявних значень випадкових величин. У зв'язку з цим такі методи застосовують для розв'язання задач оцінювання показників якості на виробництві, у соціальних системах або інших, де існує значна кількість статистичної інформації. Параметричні статистики в розв'язанні практичних задач не потребують значної кількості статистичної інформації завдяки припущенню про знання закону розподілу випадкових величин. Тому залежно від двох чинників – кількості статистичної інформації та знання закону розподілу випадкових величин – визначається група методів для ефективного розв'язання практичних задач.

Найуспішнішими є дослідження, пов'язані з вивченням законів розподілу, проведені в машинобудівній галузі. Це пов'язано з високою точністю та значною кількістю статистичної інформації. Для визначення закону розподілу існує кілька підходів. Перший ґрунтується на математичному аналізі, в основі якого лежить підбір відповідної функції для опису емпіричного розподілу. Другий підхід оснований на тому, що кожному теоретичному закону розподілу відповідають умови функціонування технологічних процесів. Цей підхід досліджено в роботі [11].

Ще один практичний метод для визначення закону розподілу – графічний. Його впровадження

пропонується для інженерних розрахунків, коли не потрібна значна точність. Цей метод простий і зручний у цехових умовах, але має невелику точність [12]. Існують також методи оцінювання функції розподілу за малою вибіркою [13]. Один із них – метод, оснований на використанні ймовірнісних аркушів [14], на які нанесено спеціальну координатну сітку. Для кожного класу розподілу пропонується одна форма ймовірнісного аркуша із чітко визначеними шкалами по осях координат. В основу побудови графіків на ймовірнісному аркуші покладено один із принципів теорії порядкових статистик.

Іншими вченими розроблено декілька методів, що дають змогу визначати або будувати потрібну функцію розподілу досліджуваного параметра технічного виробу за малою вибіркою, а саме: метод прямокутних внесків [15], метод зменшення невизначеності [16] і метод апіорно-емпіричних функцій [17]. Останній метод є найефективнішим серед розглянутих, однак він потребує, щоб була відома апіорна інформація про передбачуваний вид шуканої функції розподілу, що не завжди можливо. Крім того, у деяких випадках апіорна інформація про вид шуканої функції достатньою мірою сумнівна або взагалі відсутня.

Одне з основних питань математичної статистики – якою має бути мінімально необхідна інформація для отримання потрібного достовірного результату. Зокрема мова піде про кількість зразків, поставлених на випробування за інших рівних умов. Якщо мати на увазі під умовами відсутність будь-яких обмежень щодо точності кінцевого результату статистичного аналізу, то відповідь на поставлене запитання надано в роботах [18, 19]. Дослідження щодо малих вибірок пов'язані з іменами О. Колмогорова, Дж. Неймана та А. Вальда. Так, М. Колмогоров установив критерій достатності статистики за обмеженого числа спостережень. Дж. Нейман створив новий напрям у статистиці, основне положення якого сформульовано так: "Завдання статистики – виявляти загальний характер поведінки об'єкта в умовах невизначеності".

Така позиція цілком узгоджується з обмеженою можливістю робити надто конкретні висновки в разі малих вибірок. Ідеї Дж. Неймана лягли в основу теорії рішень – апарату прийняття гіпотези за явної неповноти інформації. А. Вальд розробив розділ статистики, названий послідовним аналізом. Необхідний обсяг вибірки визначається безпосередньо в процесі

випробувань. Теоретично послідовна процедура вимагає для ухвалення рішення менший обсяг вибірки, ніж за заздалегідь фіксованого обсягу. Але в разі малої вибірки дискретність параметра може позначитися негативно. Тому до такого висновку необхідно підходити з обережністю.

Метою роботи є розроблення методики визначення мінімальної кількості періодів, за які необхідно й достатньо оцінювати індекси сталого розвитку держав.

Математичний апарат

Для визначення кількості періодів, упродовж яких братимуть до уваги числові значення ІСР, необхідно знати їх закон розподілу протягом певного часового періоду як випадкових величин. Числові значення ІСР, отримані за конкретний час спостереження, є інформацією, важливою для вирішення практичних завдань з управління соціально-економічними системами. Під інформацією розуміємо відтворення кількості періодів, за який прийматимемо оцінку показників ІСР. Тоді правомірним є твердження, що під час розв'язання практичних задач статистичними методами здійснюється вилучення інформації з обмеженого часового періоду, результат якого поширюється на показники всього процесу чи явища.

В умовах обмеженої інформації зазвичай оперують малою вибіркою, під якою розуміють незначну кількість спостережень над випадковою величиною, що описує досліджуване явище. До визначення малої вибірки можна підходити з інформаційних позицій. Оскільки, як зазначалося, випадкова вибірка несе інформацію про явище, що вивчається, то статистичне опрацювання є ніщо інше, як отримання інформації з вибірки.

Правильність та ефективність розв'язання практичних задач статистичними методами визначається обсягом інформації про функціонування досліджуваного процесу, яку можна поділити на консервативну й оперативну. До консервативної інформації належить знання закону розподілу та знаходження ефективних статистичних оцінок його параметрів, а до оперативної – обсяг вибірки. Під інформацією в цьому разі будемо розуміти відображення випадковою вибіркою досліджуваного явища, тому можна сказати, що під час статистичного аналізу відбувається вилучення інформації з вибірки. В умовах обмеженої інформації необхідно розробити

нові методи, що дають змогу ефективно використовувати статистичну інформацію. Основою для розроблення таких методів може стати теорія порядкових статистик.

Розглянемо сутність порядкових статистик. Якщо x_1, \dots, x_n – вибірка обсягом n (n – сукупність незалежних і однаково розподілених випадкових величин) із генеральної сукупності, що має розподіл $F(x)$, то $x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ – відповідні упорядковані величини, які називаються порядковими статистиками з $F(x)$. Якщо для звичайної вибірки ентропія відмінна від нуля, то для порядкових статистик вона дорівнює нулю за рахунок упорядкування $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$. Отже, упорядкування величин x_i дає додаткову інформацію про процес без зміни обсягу вибірки. Це робить застосування порядкових статистик ефективнішим під час розв'язання практичних задач. Зауважимо, що додаткову інформацію отримують здебільшого завдяки ускладненню залежностей, що описують статистичні оцінки, і наявного взаємозв'язку порядкових статистик між собою.

Нехай ϵ вибірка обсягу n . Пронумеруємо вибіркові значення за зростанням їх величини: $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$. Зокрема найменшим значенням буде тоді $x_{(1)}$. Отримане після перенумерації i -те значення $x_{(i)}$ називається i -ю порядковою статистикою. У цьому сенсі медіана та квантілі є порядковими статистиками (медіана, наприклад, дорівнює $\frac{1}{2}(n+1)$ -му спостереженню, або середньому значенню $\frac{1}{2}n$ -го та $\frac{1}{2}(n+1)$ -го спостережень). Порядковими статистиками є також найменше ($i=1$) і найбільше ($i=n$) значення у вибірці. Різниця $R = x_{(n)} - x_{(1)}$ називається розмахом вибірки (вбірковим розмахом).

Дія з упорядкування вибірки називається ранжуванням. Вибірка, що містить одні й ті самі елементи, може бути реалізована в досліді $n!$ різними способами залежно від порядку проходження елементів. Якщо дослід виконано правильно, всі можливі реалізації однаково ймовірні та серед них з імовірністю $1/n!$ може виявитися вибірка, ранжована вже в процесі формування. Ця ймовірність

дуже мала навіть для невеликих обсягів вибірки. Звідси випливає, що операція впорядкування перетворює ранжовану вибірку на унікальний об'єкт.

Ранжована вибірка має ентропію, що дорівнює нулю. Тобто зменшення ентропії відбувається в процесі впорядкування. Ентропія зменшується внаслідок надходження інформації, до того ж зменшення і дорівнює кількості інформації, що надійшла. Звідси випливає, що в процесі впорядкування вибірка наповнюється незначною кількістю інформації. Ця інформація може бути корисно застосована, зокрема для отримання оцінок досліджуваного об'єкта оцінювання.

Ідентифікація закону розподілу випадкових величин

Пропонується метод ідентифікації законів розподілу випадкових величин дійсних значень ІСР. З огляду на властивості порядкових статистик, за заданого обсягу вибірки n можна на осі абсцис нанести значення їх математичних сподівань $M(Y_{(i)})$, а на осі ординат – вибіркові впорядковані результати, що наведено на рис. 1.

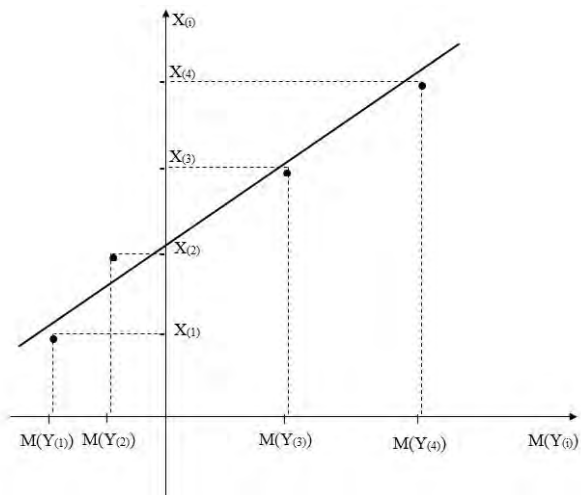


Рис. 1. Графічний вигляд методу ідентифікації закону розподілу

Прийнявши, що $M(X_{(i)}) = x_{(i)}$, знаходимо за способом найменших квадратів ту пряму, яка апроксимує ці точки, тобто таку пряму, щоб сума квадратів відхилень була мінімальна:

$$L = \sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \mu - \sigma M(Y_{(i)}))^2. \quad (1)$$

У цьому разі параметри отримують оцінки [3]:

$$\tilde{\mu} = \frac{A_2 S_1 - A_1 S_2}{n A_2 - A_1^2}; \quad \tilde{\sigma} = \frac{n S_2 - A_1 S_1}{n A_2 - A_1^2}, \quad (2)$$

де $A_1 = \sum_{i=1}^n M(Y_{(i)}), \quad (3)$

$$A_2 = \sum_{i=1}^n \left[M(Y_{(i)}) \right]^2, \quad (4)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^n x_{(i)}, \quad (5)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n x_{(i)} \cdot M(Y_{(i)}). \quad (6)$$

У праці [20] опубліковано таблиці математичних сподівань порядкових статистик (табл. 1) різних розподілів (нормального розподілу; рівної ймовірності; трикутника), що найчастіше трапляються під час розв'язання прикладних задач статистичними методами.

Методика ідентифікації закону розподілу випадкових величин полягає в тому, що для конкретного закону розподілу за фіксованого n знаходимо L , використовуючи формулу (1). Потім знаходимо L для інших законів розподілу за фіксованого значення n . Після цього порівнюємо всі знайдені L за величиною. Те значення L , що дало найменше значення за умови заданого розподілу, і дасть відповідь, який це розподіл.

Отже, використовуючи теорію порядкових статистик, можна розв'язати задачу ідентифікації закону розподілу випадкових величин за наявності незначної кількості статистичної інформації.

Таблиця 1. Математичні сподівання порядкових статистик [20]

Порядкові статистики	Математичні сподівання порядкових статистик для законів розподілу випадкових величин		
	Рівномірний	Нормальний	Трикутника
$M(Y_{(1)})$	0,090909	-1,53875	-0,3089
$M(Y_{(2)})$	0,181818	-1,00136	-0,21332
$M(Y_{(3)})$	0,272727	-0,65606	-0,14148
$M(Y_{(4)})$	0,363636	-0,37576	-0,08099
$M(Y_{(5)})$	0,454545	-0,12267	-0,02637
$M(Y_{(6)})$	0,545455	0,122667	0,026373
$M(Y_{(7)})$	0,636364	0,375764	0,080991
$M(Y_{(8)})$	0,727273	0,656059	0,141475
$M(Y_{(9)})$	0,818182	1,001357	0,213317
$M(Y_{(10)})$	0,909091	1,538752	0,308895

Скористаємося чисельним прикладом для розроблення й апробації методики ідентифікації закону розподілу випадкових величин за малою кількістю періодів оцінювання ІСР країн ЄС методами порядкових статистик. Вихідні показники індексів сталого розвитку за останні десять років подано в табл. 2.

Таблиця 2. Вихідні показники індексів сталого розвитку за останні десять років [21]

Держави ЄС	Показники індексів сталого розвитку									
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Austria	7,5	7,8	8,2	7,8	7,1	6,72	6,1	7,23	6,9	7,05
Belgium	16,4	16,1	16,2	16,1	15,6	15,42	15,09	16,2	16,01	16,03
Bulgaria	31,2	31	30,6	30,2	29,6	30,84	30,12	32,93	32,41	33,05
Croatia	28,4	28	27,7	27,1	26,5	27,43	26,43	29,56	29,01	29,67
Czech Republic	15,5	15,3	15,1	14,9	14,1	13,61	13,07	14,22	13,92	13,48
Denmark	13	12,8	12	11,6	10,9	9,32	8,92	9,84	9,62	9,73
Estonia	27,6	27,1	26,2	25,4	24,6	23,21	22,06	23,59	23,06	22,74
Finland	13	12,9	12,4	12	11,5	11,02	10,59	11,36	10,94	10,83
France	9,9	10,8	12,3	12,6	12,8	12,52	12,37	13,59	13,12	14,21
Germany	12,1	11,6	11,2	10,8	10,4	9,74	8,54	10,42	10,03	8,81
Greece	23,6	23,3	22,4	22	21,5	20,81	19,23	20,94	20,31	20,93
Hungary	22,1	21,6	21,9	22,2	22,4	22,7	23,22	25,96	25,01	25,44
Ireland	12,2	11,8	11,3	10,8	10,4	9,7	8,91	9,86	9,4	10,13
Italy	21,1	20,8	20,6	20,2	19,8	19,51	18,66	20,42	20,15	20,32
Latvia	25,5	24,7	23,6	22,9	21,3	20,24	19,84	20,91	20,22	19,94
Lithuania	28	27,1	25,8	24,9	23,8	22,96	21,92	23,09	22,9	22,36
Luxembourg	8	8,1	8,3	8,4	8,2	7,94	7,36	8,56	8,4	8,25
Malta	24,3	24	24,3	24	23,6	23,21	22,03	23,54	23,09	23,37

Продовження таблиці 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Netherlands	9,1	9,2	9	8,8	8,4	7,51	7,04	8,14	7,79	8,21
Poland	23,8	23,5	23,3	23	22,2	21,74	20,65	22,45	22,02	21,89
Portugal	19	18,7	17,6	17,2	16,6	16,13	15,38	17,01	16,5	15,71
Romania	28,4	28,1	28	27,6	26,3	26,66	26,9	29,33	28,89	29,03
Slovenia	23,1	23,5	23,3	23,1	22,4	22,16	21,54	23,07	22,49	22,08
Norway	13,6	13,1	13,5	13	12,6	12,2	11,8	10,8	11,62	11,05
Switzerland	7,1	6,9	7,0	6,5	6,2	6	5,8	5,5	6,07	5,82
Turkey	26,5	27,2	27,1	27	26,8	27,2	28,3	29,4	32,54	32,01
Spain	18,6	18,5	18,2	17,9	17,2	16,61	15,36	17,39	16,9	15,81
Slovakia	15	14,6	14,1	13,7	13	12,83	12,15	14,01	13,66	13,06
Sweden	13,9	13,6	13,2	12,6	12,1	11,63	10,73	11,69	11,04	10,8

На початковому етапі для визначення мінімальної кількості періодів оцінювання ІСР країн ЄС необхідно висунути гіпотезу щодо їх закону розподілу як випадкової величини. На початковому етапі це можна зробити візуально, якщо проаналізувати часовий ряд розподілу показників ІСР за останні десять років, зображений на рис. 2.

На рис. 2 видно, що закон розподілу належить до класу двопараметричних симетричних законів розподілу. Тому обмежимо процес ідентифікації

серед трьох законів розподілу такого класу, а саме нормального, рівномірного та закону трикутника. Крім цього, на рисунку видно, що розподілу показників індексів сталого розвитку відповідають показники всіх країн. Тому для визначення мінімальної кількості періодів з метою оцінювання достатньо використовувати ці показники на прикладі однієї країни. У нашому випадку для апробації методики застосовуватимемо показники індексів сталого розвитку країни Австрія.

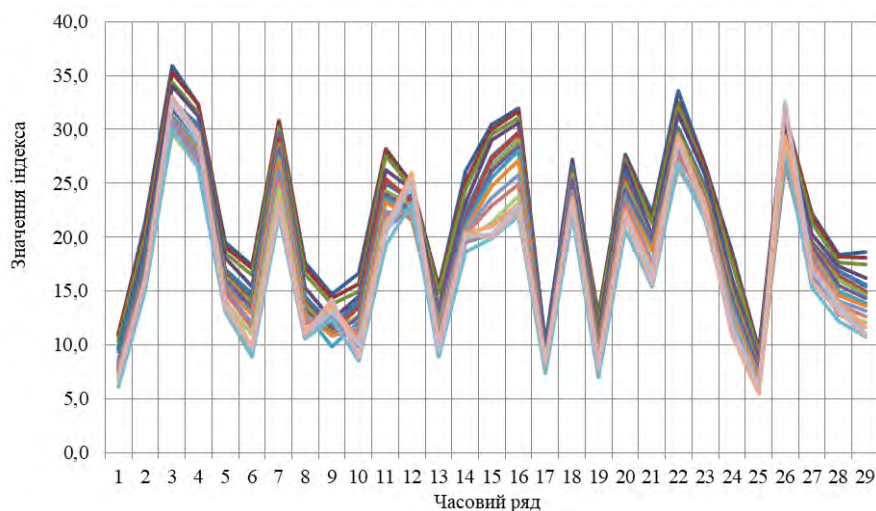


Рис. 2. Часовий ряд розподілу показників ІСР за останні десять років

Пропонується методика ідентифікації закону розподілу показників ІСР за останні десять років, що передбачає декілька кроків.

Крок 1. Збір інформації щодо показників ІСР об'єкта, який вивчається. У табл. 1 подано вихідні показники індексів сталого розвитку за останні десять років. Числа подано в їх одиницях оцінювання.

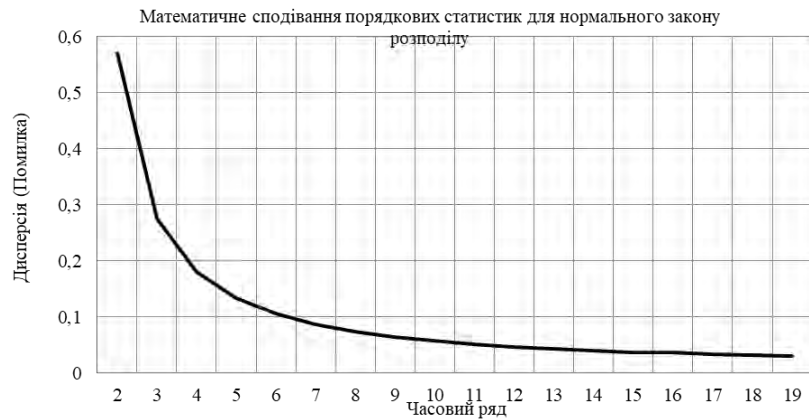
Крок 2. Упорядковуємо всі значення за зростанням. Отже, отримуємо впорядковану статистику.

Крок 3. З роботи [20] обираємо моменти порядкових статистик для передбачуваних законів розподілу, що, можливо, найточніше описують розподіли випадкових чисел. Таблиця математичних сподівань порядкових статистик для трьох законів подана в табл. 3 [20].

На рис. 3 зображено математичні сподівання порядкових статистик для трьох законів розподілу в графічному вигляді.

Таблиця 3. Таблиця математичних сподівань порядкових статистик для трьох законів розподілу

Математичні сподівання порядкових статистик для законів розподілу			
n	Рівномірний	Нормальний	Трикутника
2	0,571	0,670	0,531
3	0,276	0,258	0,241
4	0,180	0,135	0,151
5	0,133	0,082	0,108
6	0,106	0,055	0,083
7	0,088	0,040	0,067
8	0,075	0,030	0,056
9	0,065	0,023	0,047
10	0,058	0,019	0,041



а)



б)



в)

Рис. 3. Математичні сподівання порядкових статистик для трьох законів розподілу: а) нормального; б) рівномірного; в) трикутного

Крок 4. Для кожної країни ЄС за формулами (3)–(6) розраховуємо оцінки параметрів. Результати додаємо в табл. 4 для кожного із законів розподілу.

Крок 5. Для кожного закону розподілу визначаємо значення L за формулою (1). Найменше значення L відповідатиме тому чи іншому закону розподілу. Результати розрахунків для трьох законів розподілу подано в табл. 4.

Таблиця 4. Оцінки параметрів для трьох законів розподілу

Закон розподілу	A1	A2	S1	S2	μ	σ	L
Рівномірний	5	25	72,4	37,67	7,21	0,06	3,167
Нормальний	0	7,91	72,4	5,09	7,24	0,64	0,086
Трикутний	0	0,34	72,4	1,05	7,24	3,11	0,103

Відповідно до табл. 4 найменше значення L відповідає нормальному закону розподілу.

Визначення мінімальної кількості періодів для оцінювання ІСР країн ЄС

Знаючи закон розподілу випадкових величин оцінювання ІСР, визначаємо мінімальну кількість періодів для оцінювання. Для цього необхідно провести нормування значень випадкової величини та перевести всі значення в безрозмірну величину. Після нормування потрібно визначити дисперсію нормованих значень.

На прикладі показників індексів сталого розвитку країни Австрія значення дисперсії дорівнювало: $D = 0,085$. Порівнюємо це значення з табл. 3, де видно, що воно за законом рівномірне.

Для визначення мінімальної кількості періодів оцінювання індексів сталого розвитку необхідно порівняти показник дисперсії випадкових нормованих величин із дисперсією нормального закону розподілу (табл. 3). Ці значення мають бути максимально близькими. У нашому випадку

найбільш близьким значенням математичного сподівання порядкових статистик до нормального закону розподілу є значення 0,088, що відповідає $n = 7$. Це означає, що для надійної оцінки показників індексів сталого розвитку мінімальна кількість періодів оцінювання має відповідати семи рокам.

Пропозиції для подальших досліджень

У статті розглядаються симетричні закони розподілу випадкових величин, але деякі закони, що можуть характеризувати різні показники індексів сталого розвитку, можуть відрізнятися від симетричних. Наприклад, закон Вейбулла–Гнеденка, чи біноміальний, або гіпергеометричний закон розподілу. Тому завданням подальших досліджень може бути знаходження математичних сподівань для інших, несиметричних законів розподілу випадкових величин.

Висновки

Подано графоаналітичний метод ідентифікації закону розподілу випадкових величин за незначною кількістю статистичної інформації. Для цього застосовували теорії порядкових статистик. Розроблено покрокову методику ідентифікації закону розподілу випадкових величин із використанням десяти упорядкованих значень. Запропоновано математичні сподівання порядкових статистик для трьох законів розподілу.

На підставі знання закону розподілу подано методику визначення мінімальної кількості періодів оцінювання ІСР країн ЄС. Апробація методики на реальних чисельних показниках підтвердила, що мінімальна кількість періодів дорівнює семи за умови, що закон розподілу відповідає нормальному закону.

Список літератури

1. Liu Y., Huang B., Guo, H. A big data approach to assess progress towards Sustainable Development Goals for cities of varying sizes. *Commun Earth Environ.* 2023. №4 (66). DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00730-8>
2. Xu Z., Chau S. N., Chen X. Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature.* № 577. 2020. P. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1846-3>
3. Yali L. et al. Evenness is important in assessing progress towards sustainable development goals, *National Science Review.* 2021. Vol. 8. Is. 8. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa238>

4. Sabia G., Mattioli D., Langone M., Petta L. Methodology for a preliminary assessment of water use sustainability in industries at sub-basin level. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 343. P. 118–163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118163>
5. Toniolo S., Pieretto C., Camana D. Improving sustainability in communities: Linking the local scale to the concept of sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*. 2023. Vol. 101, P. 107–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107126>
6. Correia E. Garrido-Azevedo S., Carvalho H. Supply Chain Sustainability: A Model to Assess the Maturity Level. *Systems*. 2023. № 11(2):98. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020098>
7. Trishch R., Nechuviter O., Dyadyura K., Vasilevskyi O., Tsykhanovska I., Yakovlev M. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. *MM Science Journal*. 2021. P. 4769–4774. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021030
8. Ginevičius R., Trišč R., Remeikienė R., Zielińska A., Strikaitė-Latušinskaja G. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case. *Journal of International Studies*. 2022. №15 (1). P. 230–249. DOI: <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2022/15-1/15>
9. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko G. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №4 (3-82). P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75503>
10. Трищ Р. М., Кіпоренко Г. С., Кім Н. І., Денисенко А. М. Оцінювання ризиків функціонування системи управління якістю (ДСТУ ISO 9001:2015) вищих навчальних заходів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій*. 2016. № 2(38). С. 133–136
11. Fisher R. A. On the mathematical foundations of theoretical statistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. 1922. № 222. P.309-368
12. Neyman J. Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1937. № 236. P. 333–380. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1937.0005>
13. Anderson T. W, Stanley L. S. The Statistical Analysis of Data. Palo Alto, CA: Scientific Press. USA. 1986. 628 p.
14. Lehmann E. L., Joseph P. Testing Statistical Hypotheses. Springer Cham, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70578-7>
15. Jakobsson U., Westergren A. Statistical methods for assessing agreement for ordinal data. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*. 2005. №19. P. 427–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-6712.2005.00368.x>
16. Moffat R. J. Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment. *ASME*. June 1985. № 107(2). P. 173–178. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3242452>
17. Robbins H. E. An Empirical Bayes Approach to Statistics. In: Kotz, S., Johnson, N.L. (eds) Breakthroughs in Statistics. Springer Series in Statistics. Springer: New York, 1992. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5_26
18. Steiner S. H., MacKay R. J. Statistical engineering. Quality Press, 2005. 319 p.
19. Wald A. Sequential analysis. Courier Corporation, 2004. p. 212 p.
20. David H. Order statistics. John Wiley and sons, 1970. 272 p.
21. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). URL: <https://www.oecd.org/> (дата звернення: 28.02.2024).

References

1. Liu, Y., Huang, B., Guo, H. (2023), "A big data approach to assess progress towards Sustainable Development Goals for cities of varying sizes", *Commun Earth Environ*, No. 4 (66). DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00730-8>
2. Xu, Z., Chau, S.N., Chen, X. (2020), "Assessing progress towards sustainable development over space and time", *Nature*, No. 577, P. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1846-3>
3. Yali Liu et al. (2021), "Evenness is important in assessing progress towards sustainable development goals", *National Science Review*, Volume 8, Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa238>
4. Sabia, G., Mattioli, D., Langone, M., Petta, L. (2023), "Methodology for a preliminary assessment of water use sustainability in industries at sub-basin level", *Journal of Environmental Management*, Vol. 343, P. 118–163, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118163>
5. Toniolo, S., Pieretto, C., Camana, D. (2023), "Improving sustainability in communities: Linking the local scale to the concept of sustainable development", *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 101, P. 107–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107126>
6. Correia, E., Garrido-Azevedo, S., Carvalho, H. (2023), "Supply Chain Sustainability: A Model to Assess the Maturity Level", *Systems*, No. 11(2):98. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020098>

7. Trishch, R., Nechuiviter, O., Dyadyura, K., Vasilevskiy, O., Tsykhanovska, I., Yakovlev, M. (2021), "Qualimetric method of assessing risks of low quality products", *MM Science Journal*, 2021-October, P. 4769–4774. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021030
8. Ginevičius, R., Trišč, R., Remeikienė, R., Zielińska, A., Strikaitė-Latušinskaja, G. (2022), "Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case", *Journal of International Studies*, No. 15(1), P. 230–249. DOI: <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2022/15-1/15>
9. Trisch, R., Gorbenko, E., Dotsenko, N., Kim, N., Kiporenko, H. (2016), "Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4 (3-82), P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75503>
10. Trishch, R., Kiporenko, G., Kim, N., Denysenko, A. (2016), "Risk assessment of the quality management system (SSTC ISO 9001:2015) of higher education institutions" ["Otsiniuvannia ryzykiv funktsionuvannia systemy upravlinnia yakistiu (DSTU ISO 9001:2015) vyshchykh navchalnykh zakhodiv"]. *Control, navigation and communication systems*, No. 2 (38), P. 133–136.
11. Fisher, R. (1922), "On the mathematical foundations of theoretical statistics", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, No. 222, P. 309–368.
12. Neyman, J. (1937), "Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, No. 236, P. 333–380. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1937.0005>
13. Anderson, T., Sclove, S. (1986), *The Statistical Analysis of Data*, Palo Alto, CA: Scientific Press, USA, 628 p.
14. Lehmann, E., Joseph, P. (2022), *Testing Statistical Hypotheses*, Springer Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70578-7>
15. Jakobsson, U., Westergren, A. (2005), "Statistical methods for assessing agreement for ordinal data", *Scandinavian Journal of Caring Sciences*, No. 19, P. 427–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-6712.2005.00368.x>
16. Moffat, R. J. (June 1985), "Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment", *ASME*, No. 107(2), P. 173–178. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3242452>
17. Robbins, H. (1992), *An Empirical Bayes Approach to Statistics*, In: Kotz, S., Johnson, N. (eds) Breakthroughs in Statistics, Springer Series in Statistics, Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5_26
18. Steiner, S., MacKay, R. (2005), *Statistical engineering*, Quality Press. 319 p.
19. Wald, A. (2004), *Sequential analysis*, Courier Corporation. 212 p.
20. David, H. (1970), *Order statistics*, John Wiley and sons, 272 p.
21. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), available at: <https://www.oecd.org/> (last accessed: 28.02.2024).

Надійшла 05.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Черняк Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: olena-cherniak@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6167-8809>

Багаєв Ігор Олександрович – Навчально-науковий інститут "Українська інженерно-педагогічна академія" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9101-5114>

Катрич Олег Олександрович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", докторант кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: o.katrich@kernel.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-9140-4632>

Теслов Олександр Анатолійович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: vyatcheslav.shevchenko@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-9117>

Косиченко Ольга Миколаївна – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: o.kosyuchenko@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-9117>

Шевченко Вячеслав Петрович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: vyatcheslav.shevchenko@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-2044-2909>

Cherniak Olena – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Educational and Scientific Institute "Ukrainian Engineering Pedagogics Academy" V. N. Karazin Kharkiv National University, Associate Professor at the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Bahaiev Ihor – Educational and Scientific Institute "Ukrainian Engineering Pedagogics Academy" V. N. Karazin Kharkiv National University, Postgraduate Student at the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Katrych Oleh – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Doctoral Candidates at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Teslov Oleksandr – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kosychenko Olha – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Senior Lecturer at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Shevchenko Viacheslav – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

DETERMINATION OF THE MINIMUM NUMBER OF PERIODS FOR ASSESSING THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT INDICES OF THE EU COUNTRIES USING THE METHODS OF ORDINAL STATISTICS

The **subject matter** of the article is the process of assessing the sustainable development indices of the European Union countries. The **goal** of the article is to develop a methodology for determining the number of periods for which it is necessary and sufficient to assess the sustainable development indices of states. The article results the following **task**: to develop a methodology for determining the law of distribution of random variables of sustainable development indices. Determination of the minimum number of periods for assessing the sustainable development indices of the European Union countries. **Methods** used: parametric and ordinal statistics. The following **results** are obtained: parametric and non-parametric methods of statistics, their advantages and disadvantages are considered. Various methods of estimating the distribution function for small samples, in particular the method of rectangular contributions and the method of uncertainty reduction are analysed. Particular attention is paid to the problem of changing the law of scattering of quality indicators when changing the conditions of technology. A graph-analytical method for identifying the law of distribution of random variables based on a small amount of statistical information is proposed. For this purpose, the theory of ordinal statistics was used. A step-by-step methodology for identifying the law of distribution of random variables using 10 ordered values has been developed. The mathematical expectations of ordinal statistics for three distribution laws are proposed. A methodology for determining the number of periods for assessing the indices of sustainable development of countries using ordinal statistics is developed. The study is based on the analysis of statistical data for the last ten years and their ordering in ascending order. The mathematical expectations of ordinal statistics are used to select appropriate distribution laws. Given the limited information available when working with small samples, the article proposes a methodology that allows obtaining the maximum amount of information from the available data. The developed approach makes it possible to take into account the uncertainty of the phenomenon under study and make informed decisions based on statistical analysis. **Conclusions**: based on the knowledge of the law of distribution, a methodology for determining the minimum number of periods for assessing the sustainable development indices of the European Union countries is proposed. Testing of the methodology on real numerical data has confirmed that the minimum number of periods is seven, provided that the distribution law follows the normal law.

Keywords: law of distribution; quantity of assessment periods; statistical information; identification; mathematical expectation; ordinal statistics; dispersion; index of sustainable development.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Черняк О. М., Багаєв І. О., Катрич О. О., Теслов О. А., Косиченко О. М., Шевченко В. П. Визначення мінімальної кількості періодів для оцінювання індексів сталого розвитку країн ЄС методами порядкових статистик. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 215–225. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.215>

Cherniak, O., Bahaiev, I., Katrych, O., Teslov, O., Kosychenko, O., Shevchenko, V. (2024), "Determination of the minimum number of periods for assessing the sustainable development indices of the EU countries using the methods of ordinal statistics", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 215–225. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.215>

О. Черняк, Л. Фатєєва, М. Яковлев, Т. Рибальченко, Д. Зась, В. Кузнєцов

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ПРАЦІ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ МІЖНАРОДНОГО СТАНДАРТУ ISO 45001:2018 НА ЕТАПІ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Предметом дослідження є оцінювання якості системи управління безпекою праці. **Мета роботи** – розроблення методики оцінювання системи управління безпекою праці на етапі функціонування. У статті розв’язуються такі **завдання**: дослідити можливість застосування методів аналізу динамічних характеристик системи управління безпекою праці та розробити алгоритми й методики використання критеріїв непараметричних статистик. Упроваджені **методи**: кваліметрія та математична статистика. **Досягнуті результати**. Проаналізовано вимоги міжнародного стандарту ISO 45001:2018 з метою визначення необхідності проведення моніторингу, вимірювання та аналізу функціонування системи управління безпекою праці, унаслідок якого з’ясовано, що ефективність розроблення та впровадження системи управління безпекою праці залежить від методології оцінювання. Проаналізовано наявні дослідження та публікації з питань оцінювання процесів, зокрема пов’язаних з безпекою праці. Розглянуто методи оцінювання математичних систем оброблення та контролю за грубими помилками та стаціонарністю, що є ключовими для аналізу процесів управління безпекою праці. Детально описано непараметричні критерії для перевірки стаціонарності випадкових процесів. Порівняно послідовності середніх значень і середніх квадратів з очікуваними значеннями, щоб з’ясувати, чи виправдані відхилення гіпотези про стаціонарність. Визначено доцільність застосування цих методів для аналізу систем управління безпекою праці. Проаналізовано динамічний характер процесів і важливість моніторингу та аналізу інформації для забезпечення ефективних практик управління безпекою праці. **Висновки**. Обґрунтовано застосування методів аналізу динамічних характеристик системи управління безпекою праці та розроблено алгоритми й методики використання критеріїв непараметричних статистик, що дають змогу отримати оцінку системи, зважаючи на обмеженість інформації про її показники та відсутність знань закону розподілу їх як випадкової величини.

Ключові слова: оцінювання; кваліметрія; узагальнений показник; шкідливі та небезпечні чинники; статистичні методи; система управління безпекою праці.

Вступ

Оскільки система – це комплекс взаємодіючих елементів, а система управління безпекою праці – це комплекс взаємодіючих процесів, тому пропонується оцінювати систему управління безпекою праці способом оцінювання комплексу взаємозалежних процесів. Для відповідності до вимог міжнародного стандарту [1] щодо проведення моніторингу вимірювання та оцінювання процесів у сфері безпеки та гігієни праці необхідно створити систему вимірювання та постійного контролю якості цих процесів. Під якістю процесів розуміємо показники результатів вимірювання шкідливих і небезпечних чинників. Наступним етапом необхідно об’єднати оцінки різних чинників в один масив інформації та спробувати оцінити його як одне ціле. Така процедура дозволить збільшити кількість інформації про оцінки якості системи як сукупність процесів завдяки об’єднанню всіх оцінок показників шкідливих та небезпечних чинників в один масив.

Унаслідок цього можна більш об’єктивно та надійно оцінити систему загалом.

Управління безпекою праці на будь-якому підприємстві відбувається із взаємодією людини та складних технічних систем, що призводить до виникнення ситуацій, які потребують ефективних принципів та підходів до їх вирішення. Одним із таких принципів є аналіз ризиків, що полягає у виявленні, оцінюванні та усуненні можливих небезпечних чинників, які можуть спричинити нещасні випадки, професійні захворювання або матеріальні збитки.

З розвитком теорії ймовірностей та математичної статистики статистичні методи застосовуються для виконання різноманітних практичних завдань, що можна подати у вигляді основних груп: статистичний аналіз точності та стабільності процесів; статистичне регулювання процесів; статистичний приймальний контроль; статистичні методи оцінювання якості; статистичне прогнозування якості процесів і продукції.

Виконання окреслених завдань можливе за допомогою двох груп методів – параметричних і непараметричних статистик. Непараметричні статистики не вимагають знання закону розподілу випадкової величини, а використовують лише вибіркові значення з генеральної сукупності. Їх недолік полягає в тому, що вони потребують великого обсягу статистичних показників (великої вибірки), але основною перевагою є їх здатність вирішувати практичні завдання без знань закону розподілу випадкових величин показників якості. Параметричні статистики завжди потребують значної кількості статистичної інформації та припущення знання закону розподілу випадкових величин показників якості. Тому, залежно від цих двох факторів, визначається група методів для ефективного виконання практичних завдань управління якістю.

Для кількісного оцінювання системи управління безпекою праці необхідно:

- розробити процедуру збору та підготовки інформації про показники шкідливих і небезпечних чинників;
- визначити форми та методи аналізу інформації про показники шкідливих і небезпечних чинників;
- обґрунтувати критерії для оцінювання системи та розробити відповідні методики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стандарт ISO 45001:2018 "Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування" висуває вимоги до системи управління охороною здоров'я та безпекою праці (ОЗіБП), а також містить настанови щодо їх використання, щоб дати змогу організації створити безпечні та здорові умови праці на робочому місці, запобігаючи травмам і погіршенню стану здоров'я, що пов'язані з виробництвом, та активно вдосконалюючи свої показники діяльності у сфері ОЗіБП [1].

Для ефективного вирішення питань забезпечення безпеки праці на підприємстві необхідно, щоб були розроблені та науково обґрунтовані методики та процедури оцінювання безпеки праці. Вони мають бути уніфіковані та мати статус нормативного документа. Аналіз вимог ISO 45001:2018 підтверджує необхідність оцінювати стан безпеки праці. Так, наприклад, у розділах стандарту містяться певні положення.

– *Розділ 6.1.2.2.* Методологія та критерії для оцінювання ризиків у галузі ОЗіБП мають бути

визначені організацією, зважаючи на їх сфери дії, характер та вчасність. Документована інформація, пов'язана з цими методами та критеріями, має керуватися та зберігатися.

– *Розділ 9.1.1.* Щоб забезпечувати досягнення очікуваних результатів системи управління ОЗіБП, необхідно здійснювати моніторинг, вимірювання та аналіз процесів. Організація має оцінювати показники в галузі ОЗіБП та визначати результативність системи управління ОЗіБП. Необхідно, щоб організація визначала методи моніторингу, вимірювання, аналізу та оцінювання показників, наскільки це застосовне, щоб гарантувати придатні результати та критерії, відповідно до яких організація оцінюватиме показники в галузі ОЗіБП [1].

На практиці оцінювання умов праці зводиться до ідентифікації шкідливих та небезпечних чинників, пов'язаних із трудовою діяльністю, та встановлення кількісного ступеня ризику порушення здоров'я працівника. Для належного прогнозування та мінімізації шкідливих і небезпечних чинників необхідно їх оцінювати, а оцінки повинні мати кількісний вираз.

Методи кваліметрії впроваджують для отримання кількісних показників якості різних об'єктів [2–5], зокрема системи шкідливих виробничих чинників, які можуть вплинути на здоров'я та життя працівників. Кваліметрія є наукою, що вивчає методологію кількісного оцінювання якості об'єктів і процесів різної природи [6–9]. Розглянемо систему шкідливих та небезпечних виробничих чинників як об'єкт кваліметрії.

Для того, щоб обрати той чи інший метод кваліметрії для оцінювання системи управління безпекою праці, необхідно розглянути її особливості. Важливою ознакою системи управління безпекою праці є те, що вона характеризується багатьма показниками шкідливих і небезпечних чинників, які мають різномірні та різнорозмірні шкали. Тому одне із завдань кваліметрії – оцінювання різнорозмірних показників шкідливих і небезпечних чинників за єдиною безрозмірною шкалою, що дасть змогу надалі отримувати комплексний чи узагальнений показники.

У роботі [3] для перетворення різномірних одиничних показників шкідливих чинників у безрозмірну шкалу запропоновано використовувати експоненціальний розподіл з теорії екстремальних статистик. У дослідженні [10] автори використовували систему з десяти математичних залежностей між окремими різнорозмірними показниками шкідливих

чинників та їх оцінками на безрозмірній шкалі від 0 до 1. Це дало змогу отримати кількісну безрозмірну оцінку безпеки умов праці на виробництві. Для визначення параметра форми математичних залежностей запроваджувався метод аналізу ієрархій, оснований на порівнянні чинників, щоб приймати рішення щодо оцінки безпеки та гігієни праці за однією з десяти залежностей. Розроблена методика була апробована на підприємстві, і результати підтвердили, що з її допомогою можна отримати кількісну оцінку безпеки умов праці на виробництві.

У дослідженні [11] пропонується використовувати функцію помилки (*erf*) для отримання оцінок небезпечних чинників на безрозмірній шкалі. Застосовуючи функцію щільності розподілу випадкових величин шкідливих чинників, автори розробили функцію щільності їх оцінок на безрозмірній шкалі та отримали функціонально залежні статистики, які дозволяють визначити ризик потрапляння оцінки в інтервал небезпечної оцінки. Науковці в роботі [12] для визначення комплексного показника шкідливого виробничого чинника рекомендують застосовувати метод інтегрування, тобто знаходження площі під ламаною поверхнею, отриманою внаслідок з'єднання точок на площині системи координат XOY . Автори використовують квадратурні формули

з методом середніх прямокутників і пропонують алгоритм визначення комплексного показника безпеки праці шляхом інтегрування.

У проаналізованих дослідженнях визначено основу для поліпшення системи управління безпекою праці на підприємстві.

Мета роботи – розробити методику оцінювання системи управління безпекою праці на етапі функціонування.

Розв'язання завдання

Розглянуті наявні методики використовуються для оцінювання показників шкідливих і небезпечних чинників у певний момент часу. Але стандарт ISO 45001:2018 [1] вимагає, щоб організація постійно і з установленою періодичністю оцінювала показники шкідливих і небезпечних чинників та системи управління повністю.

На першому етапі пропонується виміряти показники шкідливих і небезпечних чинників протягом певного періоду та отримати часовий ряд m оцінок показників шкідливих і небезпечних чинників. Якщо таких чинників декілька (n), тоді отримаємо серію – n таких часових рядів (рис. 1).

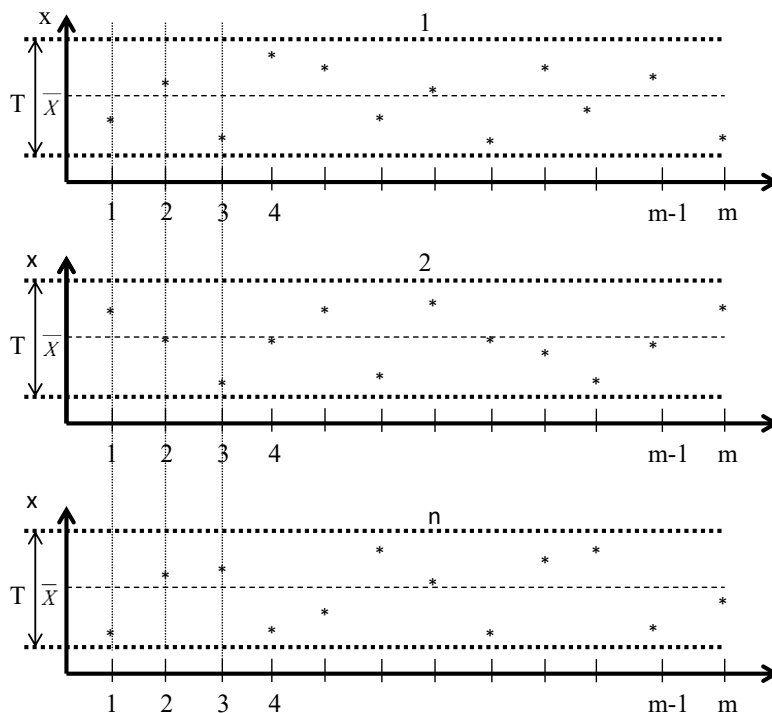


Рис. 1. Оцінки n шкідливих і небезпечних чинників протягом однакового часового інтервалу m

На наступному етапі для оцінювання системи управління безпекою праці необхідно об'єднати показники шкідливих і небезпечних чинників в один масив і отримаємо mn оцінок показників шкідливих і

небезпечних чинників, які в сукупності характеризують систему управління безпекою праці протягом певного проміжку часу (рис. 2).

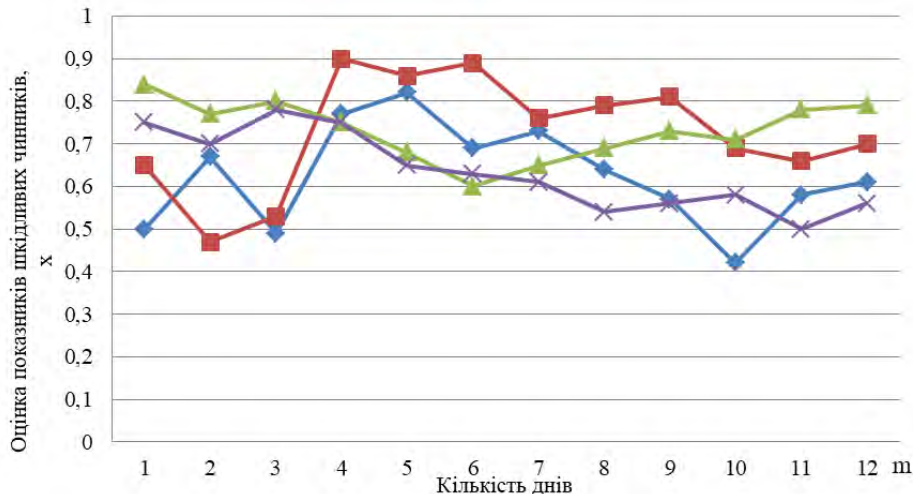


Рис. 2. Масив mn оцінок показників шкідливих і небезпечних чинників

Наступним кроком є підготовка масиву оцінок показників шкідливих та небезпечних чинників до математичного опрацювання. Для цього потрібно перевірити всі значення на наявність грубих помилок. Пропонується застосовувати критерій, що належить до непараметричних статистик, оскільки нам поки невідомий закон розподілу показників шкідливих і небезпечних чинників як випадкової величини. І тому підходить критерій, який ґрунтується на теоремі Р. Фішера [13].

Розглянемо сутність критерію Р. Фішера та запропонуємо методику оцінювання системи на наявність грубих помилок. Нехай є масив x оцінок показників n шкідливих і небезпечних чинників у вигляді безрозмірної величини від 0 до 1. Якщо впорядкувати всі значення за зростанням, то отримаємо варіаційний ряд вигляду: $x_1 > x_2 > x_3 > \dots > x_n$. Тоді з теореми Фішера випливає, що з імовірністю необхідно очікувати на виконання нерівності:

$$|x_n - \bar{x}_{n-1}| \geq S_{n-1} t_\alpha \sqrt{\frac{n+1}{n(n-1)}}, \quad (1)$$

$$\text{де } \bar{x}_{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1}, \quad S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x}_{n-1})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Для побудови критерію, необхідного для оцінювання елементів масиву, які різко виділяються, потрібно задатися настільки малий рівень значущості α , щоб здійснення умови (1) було

практично неможливим. Використання критерію полягає в тому, що за заданою величиною та обсягом масиву n з табл. 1 визначається коефіцієнт:

$$\eta = t_\alpha \sqrt{\frac{n+1}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Таблиця 1. Критичні значення для критерію Фішера [13]

n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,001$
2	15,561	77,961	779,667
3	3,513	8,104	25,8
4	2,054	3,770	8,353
5	1,520	2,522	4,716
6	1,242	1,947	3,313
7	1,068	1,618	2,601
8	0,948	1,403	1,167
9	0,859	1,250	1,879
10	0,791	1,136	1,671
11	0,736	1,047	1,515

Потім за формулою (2) визначається нерівність (1). Якщо величина x_n така, що виконується нерівність (1), величину x_n не можна вважати практично випадковою та використовувати в цьому масиві. Якщо після підстановки виявиться, що

$$|x_n - \bar{x}_{n-1}| < S_{n-1} t_\alpha \sqrt{\frac{n+1}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

то практично достовірно (з імовірністю $1-\alpha$) можна вважати величину x_n випадковою і подальший аналіз масиву необхідно проводити, беручи до уваги що

величину. Зауважимо, що ймовірність виконання окремо взятих нерівностей

$$x_n \geq \bar{x}_{n-1} + S_{n-1} t_{\alpha} \sqrt{\frac{n+1}{n(n-1)}}, \quad (5)$$

$$x_n \leq \bar{x}_{n-1} - S_{n-1} t_{\alpha} \sqrt{\frac{n+1}{n(n-1)}} \quad (6)$$

дорівнюють $\alpha/2$.

Якщо в масиві є два результати, один з яких викликає сумнів через те, що він значно більший за інші величини, а інший – через те, що він значно менший, то спочатку перевіряють гіпотезу про те, чи можна відкинути як грубе одне з підозрілих спостережень, наприклад, максимальне. Якщо виявиться, що це значення необхідно відкинути, то знову підраховують величини (2) за $n-1$ елементів масиву, які залишилися, і потім перевіряють гіпотезу про можливість відкинути спостереження з мінімальним значенням.

Застосування цього критерію для оцінювання помилок масиву є доцільним у нашому випадку, оскільки масив складається з багатьох показників m , що зі свого боку мають багато оцінок показників шкідливих і небезпечних чинників n . Тому кількість елементів у масиві відповідатиме числу mn . Цього достатньо для забезпечення потрібної потужності критерію Фішера для оцінювання значень масиву, які різко виділяються [14–16].

Наступним кроком є прийняття управлінського рішення. Якщо масив інформації, що визначає систему за допомогою оцінювання показників шкідливих і небезпечних чинників, готовий, тобто відсутні грубі помилки, то необхідно оцінити цей масив на стаціонарність, оскільки від стаціонарності чи нестаціонарності процесу залежить вибір математичного апарату подальших досліджень.

Оцінювання системи управління безпекою праці на стаціонарність

Оскільки на систему управління безпекою праці впливає значна кількість факторів і більшість з них може змінюватися в часі, це призводить до нестаціонарності динамічних характеристик процесу. Зазначене ускладнює аналіз динамічних характеристик процесу і управління ним, тобто запровадження коригувальних і запобіжних дій.

Для доказу стаціонарності випадкового процесу теоретично необхідно переконатися, що його

досліджувані статистичні характеристики не змінюються з часом. Зрозуміло, що в практиці така перевірка практично нездійсненна, оскільки кількість можливих статистичних характеристик нескінченна, а для повного опису випадкового процесу необхідно обчислити ці характеристики. Проте, якщо вважати слушними деякі важливі припущення, які зазвичай виконують більшість технологічних випадкових процесів, можна запропонувати низку практичних критеріїв стаціонарності [17]. Під випадковим процесом розуміємо розсіювання точкових показників шкідливих і небезпечних чинників у часі, отриманих методом узагальненого показника з використанням функцій бажаності.

Перше важливе припущення полягає в тому, що якщо досліджувані процеси нестаціонарні, то статистичні характеристики, які обчислюють за однією реалізацією шляхом усереднення на коротких інтервалах часу, будуть істотно змінюватися від одного інтервалу часу до іншого, в іншому випадку процеси є стаціонарними. Слово "істотно" означає, що зміни будуть більшими, ніж варто було б очікувати внаслідок статистичної вибіркової мінливості. Якщо це припущення приймається, перевірка випадкових процесів на стаціонарність полягає в дослідженні поведінки окремих реалізацій, тобто протягом певного проміжку часу. Інакше можна сказати, що доказ внутрішньої стаціонарності процесу на певному проміжку часу може бути доказом стаціонарності всього часового ряду процесу.

Друге важливе припущення зводиться до того, що для випадкових процесів достатньо перевірити слабку стаціонарність. Якщо це припущення приймається, то перевірка стаціонарності обмежується аналізом лише середніх значень і середнього квадратичного відхилення часового ряду.

Третє важливе припущення полягає в тому, що довжина досліджуваного часового ряду процесу велика порівняно з величиною випадкових помилок, які містяться в цьому процесі. Іншими словами, довжина процесу має бути настільки великою, щоб можна було відокремити систематичні складові помилки від випадкових складових. Зазначимо, що обґрунтованість такого припущення залежить від специфічних умов задачі, яку розглядають. Проаналізувавши процеси системи управління безпекою праці, можна стверджувати, що ця вимога підходить для оцінювання динамічних характеристик процесів, що розглядаються.

Маючи на увазі ці припущення, перевірку стаціонарності випадкового процесу можна здійснити способом, описаним нижче, – дослідженням кількох часових рядів (реалізацій) процесів розсіювання узагальнених показників шкідливих і небезпечних чинників. Реалізацією є часовий ряд значень узагальненого показника шкідливих і небезпечних чинників, які вимірювались впродовж певного часу.

Для оцінювання стаціонарності процесу застосуємо критерії непараметричних статистик – критерій серій та критерій інверсій [17].

Для початку необхідно отримати реалізацію для кількох шкідливих і небезпечних чинників в одній системі координат, як показано на рис. 2. У своїй реалізації чинники мають бути незалежними.

Після цього необхідно обчислити середнє значення \bar{X}_i за формулою:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{j(i)}, \quad (7)$$

де n – кількість реалізацій процесу; i – порядковий номер конкретного значення показника шкідливих і небезпечних чинників.

Необхідно обчислити середнє значення квадратів $\bar{X}_{(i)}^2$ за формулою:

$$\bar{X}_{(i)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{j(i)}^2. \quad (8)$$

Далі складаються послідовності вигляду:

$$\begin{aligned} & \bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n \\ & \bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^2, \dots, \bar{x}_n^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Потім перевіряються послідовності середніх значень і середніх значень квадратів на наявність тренду чи відхилень, які перевищували б очікувані величини відхилень, зумовлених вибірковою мінливістю.

Відповідно до поля розсіювання середніх значень і квадратів середніх значень можна будувати висновки про стаціонарність чи нестаціонарність процесу розсіювання випадкових показників. Але остаточну перевірку вибірових величин на наявність нестаціонарного тренда можна виконувати різними способами.

Якщо вибіровий розподіл, вищий від зазначених величин, відомий, можна використовувати різні параметричні критерії. Однак для того, щоб знайти вибірові розподіли середніх значень і дисперсії, необхідно мати детальні відомості про частотний склад процесу. Але в нашому випадку така інформація відсутня. Тому доцільніше і надалі

застосовувати для цієї мети непараметричні методи, що не потребують знання вибірових розподілів. Наприклад, критерій "Серії" та критерій "Тренд".

Припустимо, що послідовності середніх значень $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$ і середніх значень квадрата $(\bar{x}_1^2, \bar{x}_2^2, \bar{x}_3^2, \dots, \bar{x}_n^2)$ є вибіровими значеннями випадкової величини розсіювання розмірів у часі, що має дійсне середнє значення μ_x і дійсне середнє значення квадрата σ_x^2 відповідно [17]. Якщо ця гіпотеза правильна, то зміни вибірових значень у послідовностях є випадковими й не містять тренда. Отже, кількість серій у послідовності, де серії визначаються за будь-якою заданою величиною, дорівнюватиме очікуваному їх числу в послідовності незалежних випадкових спостережуваних значень. Крім того, число інверсій у послідовності дорівнюватиме очікуваному числу інверсій у послідовності незалежних випадкових спостережуваних значень тієї самої змінної. Якщо число серій або інверсій значно відрізняється від очікуваного, наведеного в таблицях [17], то гіпотезу про стаціонарність можна відкинути. В інших випадках її можна прийняти.

Необхідно перелічити кілька важливих особливостей зазначених непараметричних критеріїв нестаціонарності [17].

1. Немає необхідності знати ширину смуги частот досліджуваних процесів або поле розсіювання.
2. Не потрібно точно знати час опосередкування, використане визначення середніх значень і середніх значень квадратів.
3. Не обов'язково, щоб досліджувані процеси були цілком випадковими. Можна отримати достовірні висновки навіть тоді, коли процес містить гармонійні складники або основний період незначний порівняно з часом середовища, що використовувалося для визначення середніх значень і середніх значень квадрата.

Пропозиції подальших досліджень

Подальшими дослідженнями в частині оцінювання якості системи управління безпекою праці на етапі функціонування може бути вивчення законів розподілу числових значень одиничних показників шкідливих і небезпечних чинників упродовж певного часу як випадкових величин. Це дасть змогу прогнозувати надійність системи управління безпекою праці та вчасно проводити коригувальні дії.

Оскільки міжнародний стандарт ISO 45001:2018 оснований на принципах оцінювання та управління ризиками, то, знаючи закон розподілу випадкових величин показників шкідливих і небезпечних чинників протягом певного проміжку часу, можна визначати ймовірність їх виходу за межі поля допуску, що теж дозволить вчасно проводити коригувальні дії. Для цього планується отримати функції щільності оцінок одиничних показників на безрозмірній шкалі, що дасть змогу визначати ризик потрапляння числового значення оцінки показника шкідливого та небезпечного чинника в будь-який інтервал оцінювання.

Висновки

У статті обґрунтовано застосування методів аналізу динамічних характеристик системи управління безпекою праці та розроблено алгоритми й методики використання критеріїв непараметричних статистик, що дозволяють отримати оцінку системи, зважаючи на обмеженість інформації про її показники та відсутність знання закону розподілу їх як випадкової величини.

Запропоновано методику оцінювання числових значень одиничних показників шкідливих і небезпечних чинників упродовж певного часу. Вирішено насамперед проаналізувати числові значення, отримані внаслідок вимірювань, та перевірити масив інформації на наявність грубих помилок. Для цього застосовано критерій Фішера, що належить до непараметричних статистик, тому його можна використовувати, не знаючи закону розподілу випадкових величин. У статті впроваджено повноцінну методику визначення грубих помилок і для зручності практичного застосування подано табличні критичні значення для критерію Фішера.

Для оцінювання системи управління безпекою праці проаналізовано часовий ряд числових значень показників шкідливих і небезпечних чинників на стаціонарність. Адже відомо, що вибір того чи іншого математичного апарату для оцінювання якості залежить від стаціонарності процесу. Якщо процес не стаціонарний, ефективними будуть непараметричні методи оцінювання, якщо стаціонарний – можна застосовувати параметричні методи.

Список літератури

1. ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/standard/63787.html> (дата звернення: 23.02.2024).
2. Кучерук В. Ю., Глушко М. В. Оцінювання якості відгуків на основі кваліметричного методу "The value of opinion". *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. Вип. 3, Вересень 2022. Р. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-2-22-34>
3. Ginevicius R., Trishch R., Bilan Y., Lis M., Pencik J. Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries. *Energies*. 2022. № 15. 3322 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093322>
4. Stefanovića V., Urošević S., Mladenović-Ranisavljević I., Stojilković P. Multi-criteria ranking of workplaces from the aspect of risk assessment in the production processes in which women are employed. *Safety Science*. 2019. № 116. P. 116–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.006>
5. Ginevičius R., Trišč R., Remeikienė R., Zielińska A., Strikaitė-Latušinskaja G. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case. *Journal of International Studies*. 2022. № 15(1). P. 230–249. DOI: <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2022/15-1/15>
6. Кім Н. І. Узагальнений показник якості об'єктів кваліметрії різної природи. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2021. Вип. 1. С. 94–101. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-12](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12)
7. Кучерук В. Ю., Глушко М. В. Покращення якості рекомендаційних систем на основі кваліметричних методів вимірювання. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2022. Вип. 2, С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-9>
8. Буданов П. Ф., Бойко Т. Г., Грінченко Г. С., Нечуйвітер О. П., Цихановська І. В. Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів. *Машинобудування*. 2022. № 30. С. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30>
9. Рудик Ю. І. Оцінювання безпеки складних організаційно-технічних систем кваліметричними методами з урахуванням ризиків: дис. д-ра техн. наук: 05.01.02 "Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення". 2021. Львів, 312 с.

10. Черняк О. М., Тріщ Р. М., Денисенко А. М. Методика оцінювання шкідливих чинників, які впливають на здоров'я робітників машинобудівного підприємства. *Вісник НТУ "ХПІ", Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2019. № 5 (1330). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.09>
11. Сороколат Н. А., Фатєєва Л. Ю. Оцінювання якості процесів системи управління безпекою праці, згідно вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018. *Машинобудування*. 2022. № 29. С. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-89-96>
12. Черняк О. М., Сороколат Н. А., Фатєєва Л. Ю., Багасєв І. О., Тріщ Ю. В. Застосування методу інтегрування для отримання комплексного показника безпеки праці. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2023. № 1(15). С. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.08.11>
13. Fisher R. A. *Statistical methods for research workers*. Edinburgh and London: Oliver and Boyd. 1936. 339 p.
14. Арпентьєв Б. М., Тріщ Р. М., Лаврентьєва А. В. Статистичні методи як інструмент оцінювання якості. *Стандартизація, сертифікація, якість. Науково-технічний журнал*. 2004. № 5. С. 67–71.
15. Тріщ Р. М., Михайлов В. В. Багатомірний статистичний контроль показників якості технологічного процесу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2005. № 5. Ч. 1, Т. 1 (69): Технічні науки. С. 34–38.
16. Тріщ Р. М. Оцінка технологічних систем по параметру якості. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2007. № 1. С. 51–54.
17. Julius B., Piersol A. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Hoboken, New Jersey, John: Wiley and Sons, Incorporated. 1971. 594 p.

References

1. ISO 45001:2018 "Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use", available at: <https://www.iso.org/standard/63787.html> (last accessed: 23.02.2024).
2. Kucheruk V., Hlushko M. (2022), "Assessing the quality of feedback based on the qualimetric method "The value of opinion"" ["Otsiniuvannia yakosti vidhukiv na osnovi kvalimetrychnoho metodu "The value of opinion""], *Scientific papers of Vinnytsia National Technical University*, No. 3. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2022-2-22-34>
3. Ginevicius, R., Trishch, R., Bilan, Y., Lis, M., Pencik, J. (2022), "Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries", *Energies*, No. 15, 3322 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093322>
4. Stefanovića, V., Urošević, S., Mladenović-Ranisavljević I., Stojilković, P. (2019), "Multi-criteria ranking of workplaces from the aspect of risk assessment in the production processes in which women are employed", *Safety Science*, No. 116, P. 116–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.006>
5. Ginevičius, R., Trišč, R., Remeikienė, R., Zielińska, A. Strikaitė-Latušinskaja, G. (2022), "Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case", *Journal of International Studies*, No. 15(1), P. 230–249. DOI: <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2022/15-1/154>
6. Kim, N. (2021), "Generalized indicator of qualimetry objects quality of various nature" ["Uzahal'nenyу pokaznyk yakosti ob'yektiv kvalimetriyi riznoyi pryrody"], *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Coast*, No. 1, P. 94–101. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-12](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12)
7. Kucheruk, V., Hlushko, M. (2022), "Improving the quality of recommender systems based on qualitative measurement methods". ["Pokrashchennia yakosti rekomendatsiinykh system na osnovi kvalimetrychnykh metodiv vymyriuvannia"], *Measuring and computing devices in technological processes*, No. 2, P. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-9>
8. Budanov, P., Grinchenko, H., Nechuyviter, O., Tsykhanovska, I. (2022), "Application of qualimetry methods to evaluate complex quality indicators of multi-parameter objects" ["Zastosuvannia metodiv kvalimetrii dlia otsinky kompleksnykh pokaznykiv yakosti bahatoparmetrychnykh ob'ektiv"], *Engineering*, No. 30, P. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30>
9. Rudyk, Y. (2021), "Safety assessment of complex organizational and technical systems by risk-based qualimetric methods" ["Otsiniuvannia bezpeky skladnykh orhanizatsiino-tekhnichnykh system kvalimetrychnykh metodamy z urakhuvanniam ryzykiv"], dissertation of doctor of technical sciences: 05.01.02 "Standardization, certification and metrological support", Lviv, 312 p.
10. Cherniak, O., Trishch, R., Denysenko, A. (2019), "Methods of assessing the harmful factors affecting the health of workers of a machine-building enterprise" ["Metodyka otsiniuvannia shkidlyvykh chynnykiv, yaki vplyvaiut na zdorovia

- robitnykiv mashynobudivnoho pidpriemstva"], *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, No. 5 (1330), P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.09>
11. Sorocolat, N., Fatieieva, L. (2022), "Quality assessment of the occupational safety management system processes according to the requirements of the ISO 45001:2018 international standard" ["Otsiniuvannia yakosti protsesiv systemy upravlinnia bezpekoiu pratsi, zghidno vymoh mizhnarodnoho standartu ISO 45001:2018"], *Engineering*, No. 29, P. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-89-96>
 12. Cherniak, O., Sorocolat, N., Fatieieva, L., Bahaiev, I., Trishch, Y. (2023), "Application of the integration method to obtain a complex indicator of labor safety" ["Zastosuvannia metodu intehruvannia dlia otrymannia kompleksnoho pokaznyka bezpeky pratsi"], *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*, No. 1(15), P. 60–67. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.08.11>
 13. Fisher, R. (1936), *Statistical methods for research workers*, Edinburgh and London: Oliver and Boyd, 339 p.
 14. Arpentiev, B., Trishch, R., Lavrentieva, A. (2004), "Statistical methods as a tool for quality assessment" ["Statystychni metody yak instrument otsiniuvannia yakosti"], *Standardisation, certification, quality. Scientific and technical journal*, No. 5, P. 67–71.
 15. Trishch, R., Mykhailov, V. (2005), "Multidimensional statistical control of process quality indicators" ["Bahatomirnyi statystychnyi kontrol pokaznykiv yakosti tekhnolohichnoho protsesu"], *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, No. 5, vol. 1 (69): Technical sciences, P. 34–38.
 16. Trishch, R. (2007), "Assessment of technological systems by quality parameter" [Otsinka tekhnolohichnykh system po parametru yakosti], *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, No. 1, P. 51–54.
 17. Julius, B., Piersol, A. (1971), *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Hoboken, New Jersey, John: Wiley and Sons, Incorporated, 594 p.

Надійшла 05.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Черняк Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Навчально-науковий інститут "Українська інженерно-педагогічна академія" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: olena-cherniak@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6167-8809>

Фатєєва Ліна Юрійвна – Навчально-науковий інститут "Українська інженерно-педагогічна академія" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: linafat81@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6460-0772>

Яковлев Максим Юрійович – доктор технічних наук, професор, Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна; e-mail: myyg2015@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3009-0719>

Рибальченко Тетяна Павлівна – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірантка кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: rybalchenko97tanya@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5162-3634>

Зась Денис Сергійович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: d.s.zas@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-5089-4060>

Кузнєцов Валерій Дмитрович – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: v.kuznietsov@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-1145-9281>

Cherniak Olena – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Educational and Scientific Institute "Ukrainian Engineering Pedagogics Academy" V. N. Karazin Kharkiv National University, Associate Professor at the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Fatieieva Lina – Educational and Scientific Institute "Ukrainian Engineering Pedagogics Academy" V. N. Karazin Kharkiv National University, Postgraduate Student at the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Yakovlev Maxym – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, The Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kharkiv, Ukraine.

Rybalchenko Tetiana – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Zas Denys – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kuznietsov Valerii – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate Student at the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE LABOUR SAFETY MANAGEMENT SYSTEM IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE INTERNATIONAL STANDARD ISO 45001:2018 AT THE STAGE OF OPERATION

The **subject matter** of the article is the assessment of the quality of the occupational safety management system. The **goal** of the article is to develop a methodology for assessment of the occupational safety management system at the stage of operation. The article solves the following **task**: to investigate the possibility of applying methods for analysing the dynamic characteristics of the occupational safety management system and to develop algorithms and methods for using the criteria of non-parametric statistics. **Methods** are used: qualimetry and mathematical statistics. The following **results** were obtained: an analysis of the requirements of the international standard ISO 45001:2018 was carried out to determine the need to monitor, measure and analyse the functioning of the occupational safety management system, which revealed that the effectiveness of the development and implementation of the occupational safety management system depends on the assessment methodology. An analysis of existing research and publications on the evaluation of processes, including those related to occupational safety, is carried out. The methods for evaluating mathematical systems for processing and controlling gross errors and stationarity, which are key to the analysis of occupational safety management processes, are considered. Non-parametric criteria for checking the stationarity of random processes are considered in detail. Sequences of means and means squares are compared with expected values to determine whether rejections of the stationary hypothesis are justified. The expediency of using these methods for analysing occupational safety management systems is determined. The dynamic nature of the processes and the importance of monitoring and data analysis to ensure effective safety management practices are analysed. **Conclusions**: The application of methods for analysing the dynamic characteristics of the occupational safety management system is substantiated and algorithms and methods for using the criteria of non-parametric statistics are developed, which allow to obtain an assessment of the system, taking into account the limited information about its indicators and the lack of knowledge of the law of their distribution as a random variable.

Keywords: assessment; qualimetry; summary indicator; harmful and dangerous factors; statistical methods; labor safety management system.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Черняк О. М., Фатєєва Л. Ю., Яковлев М. Ю., Рибальченко Т. П., Зась Д. С., Кузнєцов В. Д. Оцінювання якості системи управління безпекою праці відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018 на етапі функціонування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 226–235. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.226>

Cherniak, O., Fatieieva, L., Yakovlev, M., Rybalchenko, T., Zas, D., Kuznietsov, V. (2024), "Assessment of the quality of the labour safety management system in accordance with the requirements of the international standard ISO 45001:2018 at the stage of operation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 226–235. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.226>

В. АЩЕПКОВ

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ *ISOLATION FOREST* ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Предметом дослідження є модель ізольованого лісу, яка є потужним та ефективним інструментом для виявлення аномалій у вимірюваних показниках та викидів, що може застосовуватися в різних сферах, де важливо забезпечити високу точність і надійність вимірювань. **Мета роботи** – застосування моделі ізольованого лісу для виявлення незвичайних або аномальних зразків, що відрізняються від типових патернів у вихідних показниках. Це досягається з допомогою ізоляції аномальних зразків від нормальних з допомогою побудови багатьох різних дерев рішень. **Завданням статті** є виявлення викидів у результатах, які були отримані в процесі дослідження з підготовки до міжнародних порівнянь на державному первинному еталоні масової та об'ємної витрати рідини, маси та об'єму рідини, що протікає по трубопроводу, з допомогою вимірювання коріолісового витратоміра. Показники, зібрані під час метрологічних досліджень, обробляються моделлю для виявлення аномалій. Ця модель аналізує результати та визначає аномальні або викидні значення, що можуть свідчити про систематичні або випадкові помилки вимірювань. Вона дає змогу швидко та ефективно виявити навіть найменші відхилення в показниках, що допомагає підтримувати високу точність і достовірність результатів вимірювань. Основними **методами** вияву викидів у статистичному аналізі, які не залежать від розподілу показників, є критерій Граббса, міжквартильний розподіл, середньоквадратичне відхилення. Вони чутливі до розміру вибірки, але є простими та зрозумілими інструментами. Проте модель ізольованого лісу також має обмеження, зокрема вона може бути вимогливою до обчислювальних ресурсів за умови великих обсягів інформації. Крім того, необхідно брати до уваги, що використання моделі вимагає належного налаштування параметрів для досягнення оптимальних результатів. **Результатом дослідження** є оцінка ефективності моделі ізольованого лісу способом порівняння її з традиційними методами виявлення викидів. Порівняльний аналіз результатів різних підходів до одного завдання є ефективним методом оцінювання ефективності роботи моделі. **Висновки.** Наприкінці статті сформульовано перспективу подальшого дослідження з окресленого напрямку. Робота буде спрямована на впровадження методів виявлення аномалій у вимірюваних показниках і покращення точності та достовірності результатів вимірювань у різних галузях, що може широко застосовуватися в науці та промисловості.

Ключові слова: невизначеність; виявлення аномалій; вимірювання; метрологія; оброблення даних; алгоритми машинного навчання; статистичні методи.

Вступ

Актуальність дослідження впливає із реальної потреби в автоматизації процесів та підвищенні точності вимірювань у сучасних умовах. Завдання виявлення аномалій в метрології є актуальним, що пояснюється важливістю раннього виявлення та усунення помилок у вимірюваних даних. Оскільки точність вимірювань є ключовою в багатьох сферах, зокрема промисловості, науці, технології та медицині, необхідність розроблення ефективних методів виявлення аномалій стає надзвичайно важливою.

Автоматизовані системи вимірювання збільшують обсяг та швидкість збору даних, але водночас підвищують ризик виникнення в них помилок та аномалій. Тому важливо розробляти методи та інструменти, що дають змогу вчасно виявляти ці аномалії та усувати їх на ранніх етапах вимірювань.

У цьому контексті модель ізольованого лісу є потужним інструментом для виявлення аномалій у вимірюваних даних. Її застосування може покращити якість та достовірність результатів вимірювань, а також сприяти підвищенню ефективності процесів метрологічного контролю та управління якістю.

У статті досліджено застосування моделі ізольованого лісу для виявлення аномалій у результатах вимірювань, які проводилися на державному первинному еталоні масової та об'ємної витрати рідини, маси та об'єму рідини, що протікає по трубопроводу (далі – ДЕТУ 03-04-04). У роботі порушено питання ефективності та можливості застосування запропонованої моделі в метрологічних задачах і визначено переваги її використання порівняно з традиційними методами виявлення аномалій.

Постановка завдання

Міжнародні звірення в метрології відіграють вирішальну роль у забезпеченні надійності, точності та порівняності вимірювань по всьому світу. Вони спрямовані на розроблення та прийняття міжнародних стандартів і національних еталонів, що необхідно для стандартизації методів вимірювань у різних сферах.

У період з 2002 до 2024 рр. у світі було проведено або проводиться 27 міжнародних звірень за напрямом вимірювання витрати рідини та об'єму рідини в межах *EUROMET*, *APMP (Asian Pacific Metrology Program)*, *SIM (System of Inter-American Metrology)* та *CCM (Consultative Committee for Mass and Related Quantities)* [1–3].

У процесі підготовки до міжнародних звірень за напрямом масової витрати рідини на ДЕТУ 03-04-04 досліджувалися складові частини еталона, зокрема стабільність та повторюваність масової витрати рідини, та стандартна невизначеність вимірювань похибки коріолісових витратомірів. Після проведення вимірювань коріолісових витратомірів виникла необхідність у дослідженні випадкової та систематичної похибки вимірювань. Для цього було впроваджено модель машинного навчання "Ізольований ліс", яка має виявляти аномалії в результатах вимірювання та відтворювати випадкову та систематичну похибку вимірювань.

1. Невизначеність вимірювань

Невизначеність в метрології є одним з найважливіших понять у цій галузі, оскільки відтворює ступінь неконкретності результатів вимірювань. У метрологічній практиці, навіть за використання найсучасніших методик та інструментів, неможливо уникнути впливу різних факторів, що можуть спричинити похибки та невизначеність у результаті. Ці фактори можуть бути як випадковими помилками, так і систематичними неточностями, а також іншими чинниками, такими як зміни в середовищі, умови експлуатації обладнання тощо.

У контексті метрології невизначеність зазвичай виражається у вигляді діапазону значень, у межах якого міститься справжнє значення вимірюваної величини з певною ймовірністю. Цей діапазон відтворює ступінь упевненості в результаті та дозволяє брати до уваги різні джерела

невизначеності, які можуть впливати на вимірювання. Однак у метрології також існує поняття розширеної невизначеності, що передбачає не лише стандартну невизначеність вимірювання, а й інші фактори, які додають невизначеність у результати. Це можуть бути, наприклад, нестандартні умови експлуатації обладнання, відхилення від технічних характеристик вимірювальних приладів або процесів вимірювання, а також інші чинники, які можуть впливати на достовірність результатів [4].

2. Типи невизначеності вимірювань

У метрології виокремлюють два основних типи невизначеності: тип А і тип Б.

Експериментальну дисперсію, що характеризує складник невизначеності, отриману внаслідок оцінювання за типом А, знаходять із рядів повторних спостережень, і вона є статистичною оцінкою дисперсії. Експериментальне стандартне відхилення отримують як додатний квадратний корінь із дисперсії, позначають як u_A і для зручності називають стандартною невизначеністю типу А. Оцінювання компонентів стандартної невизначеності за типом А ґрунтується на розподілах частоти. Тому для оцінювання стандартної невизначеності за типом А необхідно провести n незалежних спостережень вимірюваної величини q в умовах повторюваності. Здебільшого найкращою доступною оцінкою математичного сподівання чи очікуваного значення μ_q величини q , що змінюється випадково, є середнє арифметичне або середнє значення \bar{q} з n спостережень [5]:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k. \quad (1)$$

Експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\bar{q})$ розраховується за формулою [2, 3]

$$u_A(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n(n-1)}}. \quad (2)$$

Тип Б, або систематична невизначеність, пов'язаний із систематичними джерелами помилок або неточностей, що впливають на результати вимірювань. Оцінювання цього типу невизначеності часто вимагає складніших методів, оскільки систематичні помилки можуть бути менш передбачуваними. Приклади типу Б містять

систематичні неточності, що виникають через неоднорідність обладнання, дрейф калібрування або інші фактори, які можуть спричинити постійну похибку у вимірюваннях.

Обидва типи невизначеності відіграють важливу роль в оцінюванні загальної розширеної невизначеності результатів вимірювань, і для точного оцінювання розширеної невизначеності необхідно брати до уваги обидва типи та проводити відповідний аналіз і корекцію.

Для оцінювання невизначеностей типів А і В застосовуються різні методи й моделі, такі як аналіз часових рядів і регресійний аналіз, що дають змогу виявити та оцінити різні джерела невизначеності. У контексті метрології також упроваджуються методи машинного навчання, що можуть допомогти в цьому процесі [6]. Однак варто зауважити, що методи машинного навчання не завжди здатні безпосередньо оцінювати типи невизначеності, але вони можуть бути корисними для аналізу складних результатів і виявлення патернів, що зі свого боку допомагає ідентифікувати потенційні джерела невизначеності для подальшого управління ними та для їх зменшення.

3. Модель ізольованого лісу

Модель ізольованого лісу (*Isolation Forest*) належить до алгоритмів машинного навчання, що використовуються для виявлення аномалій у даних. Машинне навчання – це галузь штучного інтелекту, яка створює та розробляє алгоритми й моделі, здатні "навчатися" на основі даних та здійснювати прогнози або приймати рішення на підставі цього навчання. Модель ізольованого лісу є частиною сімейства методів машинного навчання, оснований на ідеї "дерев прийняття рішень". Її основним завданням є виявлення аномалій у даних, тобто об'єктах або подях, що суттєво відрізняються від інших даних або не відповідають загальному шаблону. Це може бути корисно в багатьох галузях, зокрема метрології, фінансах, медицині тощо, де важливе виявлення аномальних або потенційно небезпечних ситуацій [7–13].

Ізольований ліс працює на основі простого принципу: він буде аномальні дерева прийняття рішень, розподіляючи дані на різні підгрупи доти, доки не вдасться ізолювати аномалії в невелику кількість розподілень. Оскільки аномалії зазвичай

потребують меншої кількості розподілень для їх виділення, вони матимуть коротший шлях до кореня дерева порівняно з нормальними об'єктами даних. Отже, модель ізольованого лісу виконує завдання виявлення аномалій в даних на підставі їх ізоляції від нормальних об'єктів у невелику кількість розподілень [14].

4. Використання моделі

Модель ізольованого лісу відрізняється від традиційних методів розрахунку невизначеності тим, що аналізує кожне значення у вибірці незалежно одне від одного. У звичайних методах оцінювання невизначеності, зокрема методах найменших квадратів або максимальної правдоподібності, береться до уваги середнє значення і розкид даних для отримання оцінки невизначеності. Такий підхід дозволяє моделі ізольованого лісу виявляти аномалії на підставі їх ізоляції від нормальних об'єктів у вибірці, без необхідності знання про розподіл даних або середнє значення. Отже, вона може бути ефективним інструментом для виявлення аномалій у різних галузях, де важливе виявлення незвичайних або потенційно небезпечних ситуацій.

У процесі досліджень з підготовки ДЕТУ 03-04-04 до міжнародних звірень виконано вимірювання коріюлісового витратоміра та розраховано відносна похибка вимірювань витратоміра. Відносна похибка обчислювалася за такою формулою [15]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta m}{m_{ref}} \cdot 100\% ; \quad (3)$$

$$\Delta m = m_v - m_{ref} , \quad (4)$$

де Δm – похибка вимірювань;

m_{ref} – значення маси рідини еталона;

m_v – значення маси рідини коріюлісового витратоміра.

Значення похибок витратоміра використовувалися як вхідні показники для моделі ізольованого лісу. Вимірювання проводились на трьох точках витрати: 5 т/г, 25 т/г, 45 т/г. Кількість вимірів в одній точці не нормоване, тому відрізняється залежно від умов проведення вимірювань. У підсумку отримуємо три вибірки похибки вимірювань на трьох значеннях витрати рідини. Після оброблення вибірки алгоритмом отримуємо значення ступеня аномальності (рис. 1).

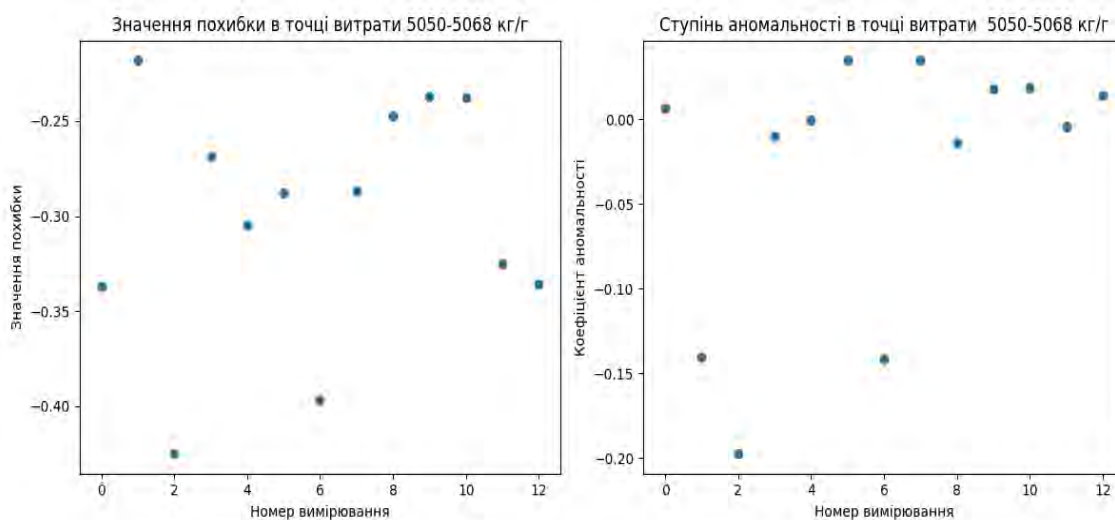


Рис. 1. Результат роботи алгоритму в першій точці витрати

Результати подані у вигляді графіків. Після застосування моделі ізольованого лісу до вхідних показників, зображених на лівому графіку (рис. 1), отримуємо графік значень ступеня аномальності для кожного вимірювання, зображеного праворуч (рис. 1). Цей ступінь аномальності дає змогу визначити, наскільки модель вважає відповідні вихідні значення вимірювання аномальними.

"Аномальність" у контексті метрології належить до незвичайних значень, що відрізняються від очікуваних значень результатів і виникають з різних причин, тобто відхилення, що можуть бути спричинені систематичною або випадковою похибкою, похибкою витратоміра та іншими невідомими факторами впливу.

5. Налаштування моделі

У налаштуванні моделі ізольованого лісу необхідно зважати на кілька параметрів, що впливають на її роботу й результати. Один із таких параметрів – кількість розподілів, що визначає, на скільки підгруп ми розподілимо дані в процесі побудови дерев рішень. Наприклад, збільшення кількості розподілів може сприяти вищій точності виявлення аномалій, але водночас може збільшити час обчислень. Максимальна кількість об'єктів у листі дерев впливає на глибину дерев і може впливати на здатність моделі розрізняти аномальні та нормальні значення. Розмір вибірки також має значення: великі вибірки здатні допомогти уникнути перенавчання моделі, але можуть збільшити час навчання.

Параметр "кількість припущених аномалій" у моделі ізольованого лісу визначає, скільки аномальних об'єктів очікується в навчальній вибірці. Цей параметр впливає на те, як модель розпізнає аномалії, та може бути корисним, якщо заздалегідь відомо або припущено, що велика кількість аномалій у навчальних даних відсутня. Що вищий цей параметр, то більш чутливою до аномалій буде модель. За умови максимального значення цього параметра (50%) всі значення ступеня аномальності визначаються в діапазоні від -1 до 1 (рис. 2). На рис. 2 зображено криву передбачення класів, яка розподіляє значення на нормальні чи аномальні.

"Максимальна глибина дерева" визначає максимальну кількість рівнів у кожному дереві, які модель буде створювати. Цей параметр впливає на здатність моделі виявляти складні взаємозв'язки між даними. Занадто мала глибина може призвести до недооцінювання аномалій, а занадто велика – до перенавчання моделі та неефективного виявлення аномалій. У процесі налаштування моделі в цьому дослідженні цей параметр дорівнює 1 000, тобто модель буде будувати 1 тис. дерев. Одне дерево зображено на рис. 3.

Дерева рішень утворюються способом випадкового вибору підмножини ознак та поділу даних на дві частини на кожному рівні побудови. Кожне дерево рішень починається з кореневого вузла, що містить усі доступні ознаки. За допомогою випадкового вибору підмножини ознак береться певна кількість ознак для розгляду на цьому рівні. Потім дані розподіляються на дві групи відповідно до значень обраних ознак і певного порога. Об'єкти,

що мають значення ознаки менше за поріг, потрапляють до однієї групи, тоді як об'єкти

з більшим значенням або таким, що дорівнює порогу, – до іншої.

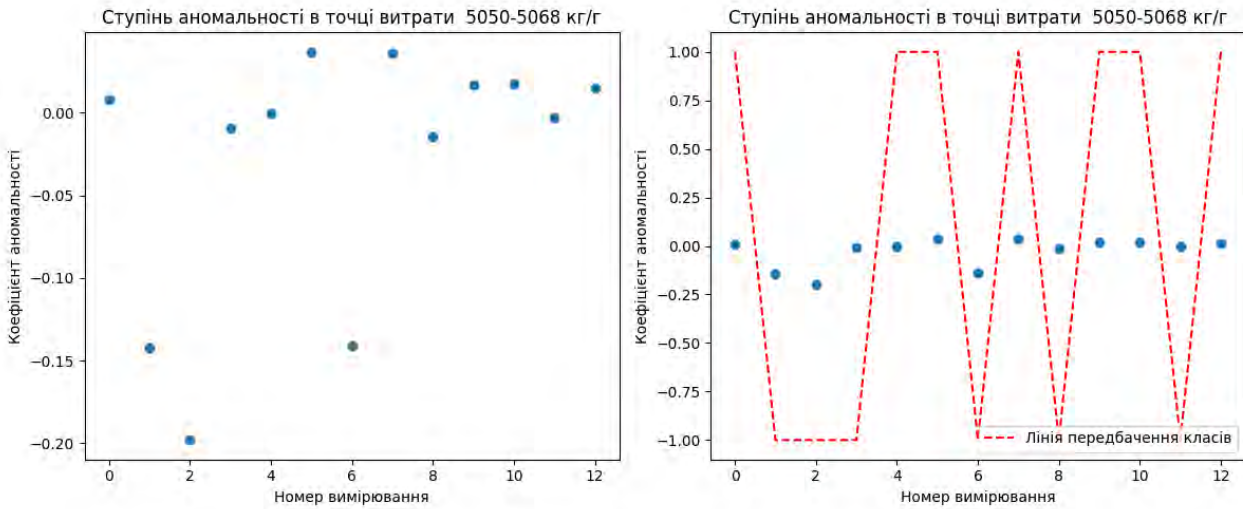


Рис. 2. Передбачення класів

Дерево рішень 1

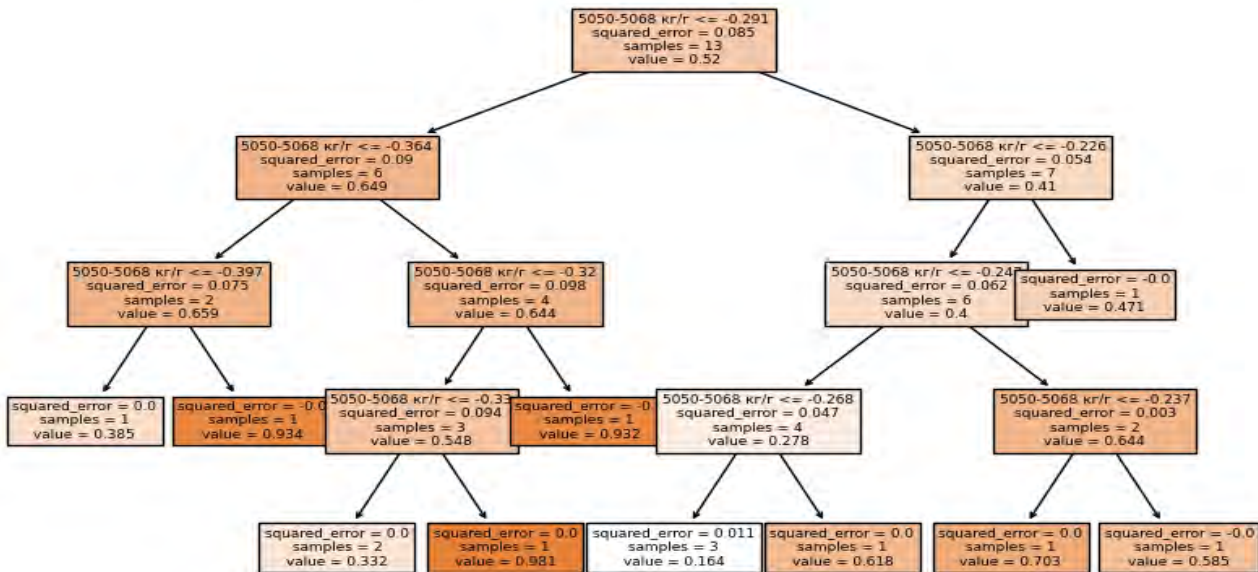


Рис. 3. Перше дерево рішень

Після розподілення даних кожна з отриманих груп стає новим піддеревом, і процес побудови повторюється для кожної з цих груп рекурсивно. Кожен новий вузол є випадковою ознакою та порогом, за яким дані розподіляються на дві частини. Цей процес триває до досягнення критерію зупинки, наприклад, досягнення максимальної глибини дерева або досягнення мінімальної кількості об'єктів у вузлі.

У дослідженні критерієм зупинки був параметр "максимальна кількість прикладів". Цей параметр

визначає максимальну кількість прикладів, які можуть бути обрані для навчання кожного дерева в лісі. Зазвичай це стосується вибору підмножини даних із великого їх набору.

В алгоритмі цей параметр визначається як "auto", тобто кількість прикладів для навчання кожного дерева дорівнює кількості загальних прикладів у наборі даних. Це означає, що для кожного дерева буде випадково обрано стільки прикладів, скільки доступно в наборі даних.

Установлення іншого значення дозволяє контролювати розмір кожної підвибірки для навчання дерева. Наприклад, якщо встановлено значення 0.5, то для кожного дерева буде випадково обрано половину прикладів із загального набору даних для навчання. Це може бути корисним для зменшення обсягу інформації та прискорення процесу навчання, особливо для великих наборів даних.

Також важливо зауважити, що алгоритм знаходить ділянку в даних, де концентрація "звичайних" або нормальних значень переважає над аномальними. Це можна уявити як пошук ділянки на графіку, де найбільше точок з "нормальними" значеннями, водночас точки, які значно відрізняються від цієї ділянки, можуть бути розглянуті як аномалії або викиди. Наприклад, якщо на графіку точки згруповані у верхній частині, то значення в цій ділянці можуть вважатися "нормальними", тоді як точка, розташована посередині графіка, де незначна концентрація значень, може бути визначена як аномалія. Цей підхід відрізняється від традиційного методу розрахунку невизначеності, де немає такого акценту на аналізі концентрації

значень. Замість цього, традиційні методи часто базуються на статистичних мірах центральної тенденції та розкиду даних.

Для зменшення випадковості результатів моделі додатково встановлюється початкове значення генератора випадкових чисел, що використовується для ініціалізації внутрішніх випадкових процесів в алгоритмі. Якщо значення встановлене на "1000", це генерує випадкове число від 0 до 999 включно щоразу, коли виконується алгоритм. Проте важливо зазначити, що якщо не зберегти це випадкове число та не застосувати його в подальших запусках моделі, кожен новий запуск генеруватиме нове випадкове число, що призведе до різних результатів. Однак, якщо обсяг даних не великий та не дуже глибоке дерево, вплив цих змін може бути незначним.

Додатково, щоб зменшити випадковість результатів, алгоритм запускає модель ізольованого лісу 10 разів, після чого результати усереднюються та подається середній результат запусків. Це дає змогу підвищити точність роботи моделі.

Як було сказано раніше, алгоритм будує 1 тис. дерев, з яких складається ліс (рис. 4).

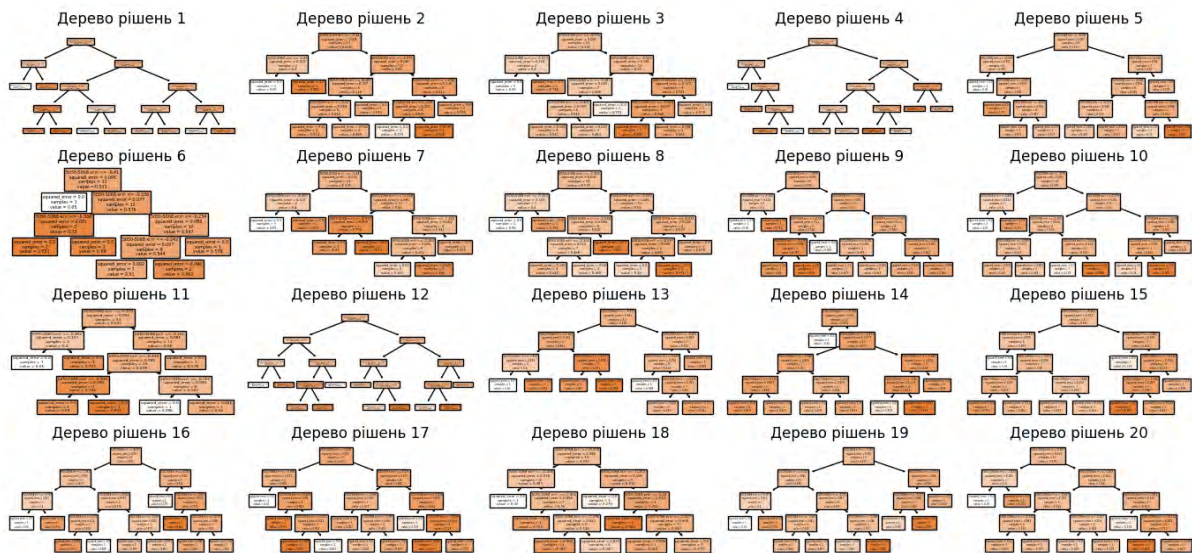


Рис. 4. Перші 20 дерев у лісі

Щоразу, коли модель будує дерево рішень, вона обирає випадкову підвибірку з початкових значень (у першій точці витрати цих значень – 11). Потім вона ізолює ці 11 значень у випадковому порядку на основі випадкової ознаки та будує дерево рішень. Цей процес повторюється 1 тис. разів, і щоразу він здійснюється саме на цих 11 значень у випадковому порядку.

Необхідно збалансувати всі параметри, щоб досягти оптимальної ефективності алгоритму.

Крім того, важливо обирати відповідні значення для цих параметрів, що забезпечать оптимальну продуктивність моделі та якість її роботи. Різні значення параметрів можуть призвести до різних результатів і впливати на здатність моделі виявляти аномалії в даних.

6. Результати дослідження

Оскільки значення отримані з одного й того самого коріюлісового витратоміра, точність якого не змінюється залежно від витрати рідини, можемо

об'єднати значення розкиду різних точок витрати. Такий підхід дасть змогу відтворити всі аномалії та викиди на одному зведеному графіку для зручності аналізу (рис. 5).

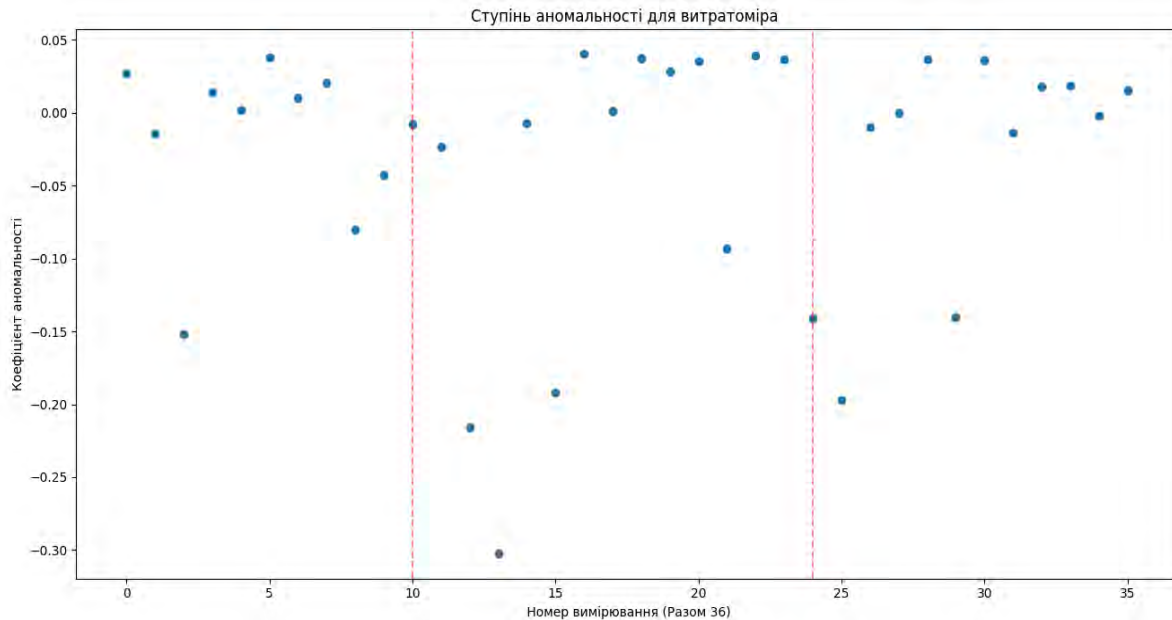


Рис. 5. Ступінь аномальності вимірювань витратоміра

На цьому зведеному графіку можна спостерігати розподіл аномальних значень для вимірювань одним витратоміром. Цей графік відтворює як систематичні, так і випадкові похибки, а також похибку самого витратоміра. Значення у верхній частині графіка показують нестабільність роботи обладнання еталона (систематична похибка) та неточність самого коріюлісового витратоміра. Значення, віддалені від скупчення точок верхньої частини графіка, відтворюють випадкові похибки вимірювання. Значення, нижчі за 0.00 на шкалі ступеня аномальності, але не віддалені від скупчення, можуть містити як систематичні, так і випадкові помилки. Цей аналіз є лише візуальною оцінкою роботи моделі. Унаслідок роботи модель вважає значення, нижчі за 0.00, аномальними, а вищі – нормальними. Модель налаштована саме на виявлення випадкових помилок (аномалій), але дає змогу й надалі досліджувати результати.

7. Оцінка ефективності моделі

Традиційні методи виявлення викидів, такі як критерій Граббса, міжквартильний розподіл,

середньоквадратичне відхилення тощо, можуть визначити точку як викид, якщо вона занадто віддалена від значень вибірки. У використанні цих критеріїв як оцінки ефективності моделі ізольованого лісу було виявлено лише одну точку як викид (лише критерієм Граббса, інші критерії не виявили у вибірці викидів), це є 13-та точка (найнижча на зведеному графіку). Розрахунок проводився для трьох вибірок аналогічно роботі алгоритму. Викид був знайдений в одній вибірці, в інших двох не було знайдено викидів. Порівняно з цим модель виявила дев'ять точок як аномальні (якщо не брати до уваги значення дуже наближенні до 0.00) з трьох вибірок окремо. Це вказує на те, що модель є більш ефективним інструментом для виявлення аномалій.

Крім того, якщо порівняти підхід моделі з традиційними методами встановлення невизначеності вимірювань, можна сказати, що розрахунки невизначеності надають кількісне значення систематичних і випадкових помилок, а модель дає розподіл цих помилок щодо їх місця у вибірці.

Однією з переваг моделі є можливість об'єднати результати значень однієї вибірки з іншими

результатами. Це дає змогу бачити більше інформації, порівнювати результати та змінювати початкові умови проведення вимірювань. Це дозволить виявляти закономірності та причини виникнення систематичних та випадкових помилок. Подальший розвиток цього дослідження буде спрямовано саме на пошук цих закономірностей для підвищення точності та стабільності роботи на еталоні.

Висновки

Використання моделі ізольованого лісу є ефективним інструментом для виявлення аномалій у даних вимірювань, особливо в контексті метрології. Цей підхід дає змогу не лише ідентифікувати аномалії та вилучати їх для поліпшення точності вимірювань, але й порівнювати отримані значення між собою, незалежно від абсолютних значень. Завдяки цьому виникає більш повна картина розподілу аномалій та викидів у вимірюваних даних. Порівняно з традиційними методами виявлення викидів, модель ізольованого лісу дозволяє ефективніше й точніше виявляти аномалії, що робить її корисним інструментом для вирішення завдань метрології та інших галузей, де важлива висока точність вимірювань. Крім того, можливість порівняння різних вибірок даних та виявлення закономірностей у вимірювальних процесах

дає змогу зменшувати невизначеність та покращувати якість результатів вимірювань.

Модель ізольованого лісу забезпечує інтуїтивно зрозумілий метод виявлення аномалій, що корисний для аналізу даних у метрології. Це розв'язок, який не потребує припущень про розподіл даних або структуру вибірки. Викиди можна не брати до уваги та вилучати з протоколу вимірювань як випадкові помилки, що допомагає зменшити невизначеність і покращити точність результатів. Цей підхід мінімізує вплив аномальних значень на загальний результат і підвищує достовірність отриманих даних. Способом вилучення викидів усувається викривлення, які можуть виникнути в статистичних характеристиках даних, таких як середнє значення або стандартне відхилення. Це сприяє більш точному оцінюванню невизначеності та покращує якість вимірювань.

Розвиток моделі ізольованого лісу відбувається в напрямі розширення сфери застосування та покращення її ефективності. Завдання додаткових досліджень – удосконалення алгоритмів виявлення аномалій та оптимізація технічних можливостей моделі для різних вимог індустрії. Такий підхід може забезпечити необхідну точність та достовірність результатів у різних сферах застосування, що робить модель ізольованого лісу важливим інструментом для подальшого розвитку метрології та наукових досліджень.

Список літератури

1. Chun S., Furuichi N. Final report of the APMP water flow supplementary comparison (APMP.M.FF-S1), *Metrologia*, Vol. 59, 2022. DOI: 10.1088/0026-1394/59/1A/07004
2. Frahm E., Arias R., Maldonado M., Vargas J., Mendoza J., Arredondo A., Silvosa M. Supplementary comparison SIM.M.FF-S9.2016 for water flow measurement, *Metrologia*, Vol. 61, 2024. DOI: [10.1088/0026-1394/61/1A/07001](https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07001)
3. Huovinen M., Frahm E. EURAMET.M.FF-S13 final report, *Metrologia*, Vol. 59, 2022. DOI: 10.1088/0026-1394/59/1A/07010.
4. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування. Посібники з вираження невизначеності вимірювань, 2006.
5. Zakharov I., Serhiienko M., Chunikhina T. Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of a household water meter, *Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. P. 83–86. 2020. DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254260
6. Vallejo M., Espriella C., Gómez-Santamaría J., Ramírez-Barrera A., Delgado-Trejos E. Soft metrology based on machine learning: a review, *Measurement Science and Technology*, Vol. 31, No. 3. P. 1–16. 2019. DOI:10.1088/1361-6501/ab4b39
7. Kebir S., Tabia K. Anomaly Detection in Real Scarce Data: A Case Study on Monitoring Elderly's Physical Activity and Sleep, *IEEE 23rd International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*, 2023, P. 385–392, DOI: 10.1109/BIBE60311.2023.00069
8. Yu B., Yu Y., Xu J., Xiang G., Yang Z. MAG: A Novel Approach for Effective Anomaly Detection in Spacecraft Telemetry Data, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 20, No. 3, P. 3891–3899. 2014. DOI: 10.1109/TII.2023.3314852
9. Li Z., Wang P., Wang Z., Zhan D. FlowGANAnomaly: Flow-Based Anomaly Network Intrusion Detection with Adversarial Learning, *Chinese Journal of Electronics*, Vol. 33, No. 1, 2022. P. 58–71. DOI: 10.23919/cje.2022.00.173

10. Barbieri L., Brambilla M., Stefanutti M., Romano C., Carlo N., Roveri M. A Tiny Transformer-Based Anomaly Detection Framework for IoT Solutions, *IEEE Open Journal of Signal Processing*, Vol. 4, 2023. P. 462-478. DOI: 10.1109/OJSP.2023.3333756.
11. Guo N., Lin C., Yan H., Zang J., Xiong M. Real-Time Pantograph Anomaly Detection Using Unsupervised Deep Learning and K-Nearest Neighbor Classification, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 73, 2024. P. 1–13. DOI: 10.1109/TIM.2024.3370747
12. Occorso M., An M., Olsen R., Perry V. Anomaly Detection as a Data Reduction Approach for Test Event Analysis at the Edge, *IEEE International Conference on Big Data (BigData)*, 2023. P. 3863–3867, DOI: 10.1109/BigData59044.2023.10386215
13. Xiang H., Zhang X., Dras M., Beheshti A., Dou W., Xu X. Deep Optimal Isolation Forest with Genetic Algorithm for Anomaly Detection, *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, 2023 P. 678–687, DOI: 10.1109/ICDM58522.2023.00077
14. Liu F., Ting K., Zhou Z. Isolation Forest, *IEEE International Conference on Data Mining*, 2008. P. 413–422, DOI: 10.1109/ICDM.2008.17
15. Jurado K., Ludvigson S., Ng S. Measuring Uncertainty, *American Economic Review*, Vol. 105 (3). 2015. P. 1177–1216. DOI: 10.1257/aer.20131193

References

1. Chun, S., Furuichi, N. (2022), "Final report of the APMP water flow supplementary comparison (APMP.M.FF-S1)" *Metrologia*, Vol. 59. DOI: 10.1088/0026-1394/59/1A/07004
2. Frahm, E., Arias, R., Maldonado, M., Vargas, J., Mendoza, J., Arredondo, A., Silvosa, M. (2024), "Supplementary comparison SIM.M.FF-S9.2016 for water flow measurement" *Metrologia*, Vol. 61, DOI: [10.1088/0026-1394/61/1A/07001](https://doi.org/10.1088/0026-1394/61/1A/07001)
3. Huovinen, M., Frahm, E. (2022), "EURAMET.M.FF-S13 final report", *Metrologia*, Vol. 59, DOI: 10.1088/0026-1394/59/1A/07010.
4. DSTU-N RMG 43:2006 Metrology. Guidance on expressing measurement uncertainty [Metrolohiia. Kerivni vkazivky z vyrazhennia nevyznachennosti vymiriuvannia], 2006.
5. Zakharov, I., Serhiienko, M., Chunikhina, T. (2020), "Measurement uncertainty evaluation by kurtosis method at calibration of a household water meter", *Metrology and Metrology Assurance (MMA)* P. 83–86. DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254260
6. Vallejo, M., Espriella, C., Gómez-Santamaría, J., Ramírez-Barrera, A., Delgado-Trejos, E. (2019), "Soft metrology based on machine learning: a review", *Measurement Science and Technology*, Vol. 31, No. 3. P. 1–16. DOI: 10.1088/1361-6501/ab4b39
7. Kebir, S., Tabia, K. (2023), "Anomaly Detection in Real Scarce Data: A Case Study on Monitoring Elderly's Physical Activity and Sleep", *IEEE 23rd International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*, P. 385–392, DOI: 10.1109/BIBE60311.2023.00069
8. Yu, B., Yu, Y., Xu, J., Xiang, G., Yang, Z. (2014), "MAG: A Novel Approach for Effective Anomaly Detection in Spacecraft Telemetry Data", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 20, No. 3, P. 3891–3899, DOI: 10.1109/TII.2023.3314852
9. Li, Z., Wang, P., Wang, Z., Zhan, D., (2022), "FlowGANAnomaly: Flow-Based Anomaly Network Intrusion Detection with Adversarial Learning", *Chinese Journal of Electronics*, Vol. 33, No. 1, P. 58–71, DOI: 10.23919/cje.2022.00.173
10. Barbieri, L., Brambilla, M., Stefanutti, M., Romano, C., Carlo, N., Roveri, M. (2023), "A Tiny Transformer-Based Anomaly Detection Framework for IoT Solutions", *IEEE Open Journal of Signal Processing*, Vol. 4, P. 462–478, DOI: 10.1109/OJSP.2023.3333756
11. Guo, N., Lin, C., Yan, H., Zang, J., Xiong, M. (2024), "Real-Time Pantograph Anomaly Detection Using Unsupervised Deep Learning and K-Nearest Neighbor Classification", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 73, P. 1–13, DOI: 10.1109/TIM.2024.3370747
12. Occorso, M., An, M., Olsen, R., Perry, V. (2023), "Anomaly Detection as a Data Reduction Approach for Test Event Analysis at the Edge", *IEEE International Conference on Big Data (BigData)*, P. 3863–3867, DOI: 10.1109/BigData59044.2023.10386215
13. Xiang, H., Zhang, X., Dras, M., Beheshti, A., Dou, W., Xu, X. (2023), "Deep Optimal Isolation Forest with Genetic Algorithm for Anomaly Detection", *IEEE International Conference on Data Mining (ICDM)*, P. 678–687, DOI: 10.1109/ICDM58522.2023.00077

14. Liu, F., Ting, K., Zhou, Z. (2008), "Isolation Forest", *IEEE International Conference on Data Mining*, P. 413–422, DOI: 10.1109/ICDM.2008.17
15. Jurado, K., Ludvigson, S., Ng, S. (2015), "Measuring Uncertainty", *American Economic Review*, Vol. 105 (3). P. 1177–1216. DOI: 10.1257/aer.20131193

Надійшла 01.03.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Ащепков Валерій Олегович – Харківського національного університету радіоелектроніки, молодший науковий співробітник Національного наукового центру "Інститут метрології", аспірант кафедри інформаційно-виміральної техніки, Харків, Україна; e-mail: ashhepkovvalera@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-3827-3445

Aschepkov Valeriy – Kharkiv National University of Radio Electronics, Junior Research Fellow at the National Scientific Center "Institute of Metrology", Postgraduate Student at the Department of Information Measurement Technology, Kharkiv, Ukraine.

THE USE OF THE ISOLATION FOREST MODEL FOR ANOMALY DETECTION IN MEASUREMENT DATA

The **subject** of the research is the Isolation Forest model, which is a powerful and efficient tool for detecting anomalies in measurement data and outliers, applicable in various fields where ensuring high accuracy and reliability of measurements is important. The **goal** of the study is to apply the Isolation Forest model to identify unusual or anomalous patterns that differ from typical patterns in the output data. This is achieved by isolating anomalous patterns from normal ones through the construction of multiple different decision trees. The **task** of the research is to detect outliers in data obtained during the preparation for international comparisons on the state primary standard for mass and volume flow rate of fluid, mass and volume of fluid flowing through a pipeline, by measuring with a coriolis flowmeter. Data collected during metrological studies undergo processing by the model to detect anomalies. This model analyzes the data and identifies anomalous or outlier values that may indicate systematic or random measurement errors. It enables quick and efficient detection of even the smallest deviations in the data, helping to maintain high accuracy and reliability of measurement results. The main **methods** for detecting outliers in statistical analysis, which are distribution-independent, are the Grubbs' criterion, interquartile range distribution, and standard deviation. They are sensitive to sample size but are simple and understandable tools. However, the Isolation Forest model also has its limitations, particularly it can be resource-demanding for large datasets. Additionally, it is necessary to consider that using the model requires proper parameter tuning to achieve optimal results. The **results** of the research include assessment of the Isolation Forest model's effectiveness by comparing it with traditional outlier detection methods. Comparative analysis of the results of different approaches to the same task is an effective method for evaluating the model's performance. **Conclusion.** The article concludes with the perspective of further research development in this direction. The work will focus on further developing methods for detecting anomalies in measurement data and improving the accuracy and reliability of measurement results in various application fields, which can find broad applications in science and industry.

Keywords: uncertainty; anomaly detection; measurement; metrology; data processing; machine learning algorithms; statistical methods.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ащепков В. О. Використання моделі *Isolation Forest* для виявлення аномалій у даних вимірювань. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.236>

Aschepkov, V. (2024), "The use of the Isolation Forest model for anomaly detection in measurement data", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 236–245. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.236>

М. КОГДАСЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ АДСОРБЦІЇ МОЛЕКУЛ ПОБУТОВОГО ГАЗУ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

Предмет. У статті комплексно досліджено адсорбцію молекул побутового газу на поверхні поруватого кремнію та її вплив на електрофізичні властивості матеріалу. **Мета.** Визначення впливу адсорбції молекул побутового газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію та виявлення можливостей використання цього ефекту для розроблення ефективних газових сенсорів. **Завдання.** У межах дослідження проведено комплексне вивчення адсорбції газу на поруватому кремнії, виміряно зміни провідності та ємності матеріалу під впливом адсорбції газу, визначено оптимальні умови для детектування побутового газу, розглянуто можливості використання досягнутих результатів у розробленні технологій моніторингу якості повітря та безпеки середовища, а також досліджено вплив різних концентрацій побутового газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію. **Методи.** У дослідженні впроваджено методи електрофізичного аналізу для вимірювання змін провідності та ємності матеріалу. **Результати.** Досягнуті результати свідчать про значущий ефект адсорбції на електрофізичні властивості поруватого кремнію. Виявлено, що адсорбційний шар газу на поверхні матеріалу викликає не лише збільшення провідності, але й значні зміни в ємності, що може бути використано для розроблення ефективних газових сенсорів. **Висновки.** Електрофізичні зміни є показниками адсорбції та можуть бути використані для реального газового моніторингу. Існують оптимальні умови для детектування побутового газу. Визначено вплив концентрацій газу на електрофізичні характеристики поруватого кремнію. Розглянуто можливості застосування досягнутих результатів у виробництві екологічно чистих сенсорних систем для моніторингу якості повітря.

Ключові слова: поруватий кремній; адсорбція; побутовий газ; електропровідність; діелектрична проникність; метан; сенсори.

Вступ

Завдяки своїм унікальним властивостям наноматеріали на основі кремнію дедалі частіше застосовуються в різних галузях науки й техніки. Як правило, технологія створення наноструктур у вигляді квантових ям, ниток і точок досить складна.

З другої половини ХХ ст. спостерігається тенденція щодо зменшення розмірності напівпровідникових структур. Квантові ями, нитки й точки зараз присутні в багатьох пристроях, таких як лазери, надпотужні комп'ютери, мобільні телефони, та є ключем до розвитку технології наногетероструктурної електроніки [1].

Електричними властивостями кремнію можна керувати за допомогою створення на його основі наноструктур – просторово розділених кремнієвих ділянок із розмірами в кілька нанометрів. Тоді носії заряду (дірки та електрони) набувають додаткової енергії внаслідок квантового розмірного ефекту [2–4].

Поруватий кремній (ПК) – це нанокристал, пронизаний сіткою з пор, де квантові ефекти відіграють основну роль. Тому ПК можна розглядати як квантову губку, і як губка він може просочуватися різними хімічними речовинами [5]. ПК має унікальні

фізичні властивості [6] і в принципі сумісний із сучасною мікроелектронною технологією.

ПК має дуже велику внутрішню поверхню (приблизно 10^3 м²/г), що в 10^3 – 10^5 разів більша, ніж у кристалічного кремнію. Таке збільшення значно підвищує адсорбційну здатність поверхні без збільшення розміру кристала. Хоча поверхня ПК пасивується, вона залишається високохімічно активною, що є важливою особливістю ПК.

Велика внутрішня поверхня та висока хімічна активність ПК роблять використання цього матеріалу для газового аналізу дуже перспективним.

ПК – ефективний матеріал для розроблення різноманітних сенсорів на його основі. Як згадувалося вище, поряд із великою площею внутрішньої поверхні та високою хімічною активністю, ПК має певні переваги. По-перше, технологія електрохімічного травлення кремнію є простою та добре відпрацьованою, що може значно спростити виготовлення сенсорів на основі ПК і знизити їх вартість. По-друге, сенсори на основі ПК можуть бути виготовлені на одній підкладці разом із керуючою мікросхемою, що дає змогу спростити та здешевити технічну вартість виготовлення кінцевого пристрою. По-третє, у деяких дослідженнях [7–9]

повідомляється про досить низьку робочу температуру (150–200°C) структур на основі ПК, за якої виявляється чимало шкідливих газів (різні вуглеводні, водень, аміак, діоксид азоту, оксид вуглецю). Важливо також наголосити на високій чутливості ПК до різних речовин. Основними недоліками ПК у використанні для газового аналізу є низька селективність та погіршення властивостей із часом (ефект старіння) [10]. Селективність потенційних сенсорів на основі ПК можна підвищити введенням різних каталітичних металів (Pt, Pd, Au, Ni) у поруватий шар або за допомогою спеціальних молекулярних фільтрів у сенсорі.

Аналіз проблеми й наявних методів

Адсорбційна чутливість поруватого напівпровідника – це його здатність реагувати на зміни в речовинах, адсорбованих на його поверхні. Поруваті напівпровідники особливо чутливі до молекул і атомів, адсорбованих на їх поверхні, завдяки великій кількості пор у структурі. Адсорбційна чутливість може бути використана для виявлення газів, парів, хімічних сполук та інших речовин у навколишньому середовищі.

Адсорбційна чутливість поруватих напівпровідників основана на зміні електричних, оптичних та інших фізичних властивостей матеріалу під впливом адсорбатів. З допомогою вимірювання та інтерпретації цих змін можна виявити та ідентифікувати адсорбовані речовини.

Відомо, що під час адсорбції на непоруватих і поруватих адсорбентах кількість адсорбованого газу або пари змінюється на різних ділянках ізотерми адсорбції. Наприклад, у разі непоруватих і мікропоруватих адсорбентів вплив властивостей адсорбенту, текстури та умов експерименту найбільш виражений у ділянці низьких відносних тисків, тоді як у разі крупнопоруватих адсорбентів вплив помітний лише за умови високих тисків, близьких до тиску насичення. У ділянці моношарового заповнення зростання адсорбції сповільнюється з підвищенням тиску та визначається утворенням пологих зон на ізотермі адсорбції, розмір яких залежить від внутрішньої структури поруватого матеріалу. У подальшому підвищенні тиску кількість адсорбованого матеріалу збільшується завдяки багатомолекулярній адсорбції, та в разі поруватих

середовищ із капілярною конденсацією адсорбція припиняється. Характер ізотерми адсорбції, яка відображає внутрішню структуру твердого тіла, визначає ступінь розвитку певних типів пор і дає змогу визначити розмір і характер структурного типу та питому поверхню адсорбенту [7].

Мета статті – дослідити процес адсорбції молекул побутового газу на поруватому кремнії, що дасть змогу вдосконалити сенсорні технології для ефективного виявлення та моніторингу газових забруднень у повітрі.

Вирішення завдання

Для отримання шарів поруватого кремнію використовували структури кремнію, леговані оловом і кремнієм (Si:Sn – Si:Si). Як підкладка застосовувався бік $n + -\text{Si:Sn}$ завтовшки 400 мкм з концентрацією носіїв заряду 10^{18} см^{-3} , на яку наносився шар $n\text{-Si:Si}$ завтовшки 20 мкм і концентрацією носіїв заряду 10^{16} см^{-3} [8].

Перед початком отримання поруватих зразків у вакуумній камері на підкладку напилювали металевий контакт.

Поруватий шар Si було отримано методом імпульсного анодного електрохімічного травлення з параметрами ($T_{\text{off}} = 40 \text{ мс}$ і $T_{\text{on}} = 100 \text{ мс}$) і силою струму 10 мА, для вирощування поруватих шарів було обрано однокамерну комірку (рис. 1). Травлення проводили в умовах кімнатної температури без освітлення в комірці із платиновим електродом і робочою площею 1 см^2 [9–11]. Для приготування досліджуваних зразків використовували розчин $\text{HF:CH}_3\text{OH}=1:1$ з додаванням HCl (5:1 за об'ємом) та FeCl_3 (20 мл) відповідно. Поруватість контролювалася з допомогою вагового методу й методу фотолюмінесценції.

Після отримання поруватого шару зразки просушувались і на цей шар електрохімічним методом як метал-каталізатор вплавили нікель зі спиртового розчину NiCl_2 за температури 70°C. Схема отриманого зразка зображена на рис. 2.

Вакуумна адсорбційна установка призначена для подачі різних адсорбентів. Схема показана на рис. 3. Установка дає змогу підтримувати тиск вакууму $p \sim 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ протягом тривалого часу.

Зразки закріплювали в тримачі та поміщали в експериментальну комірку, виводи якої під'єднували до вимірювальної плати персонального комп'ютера.

Електрична схема вимірювання описана нижче. Стабілізацію температури проводили за допомогою зовнішнього нагрівального елемента, встановленого в експериментальній комірці. Досліджувати ВАХ можна

в широкому діапазоні температур (до 300°C), у вакуумі та в атмосфері, контрольованій різними газами [12].

Вимірювання ВАХ були повністю автоматизовані.

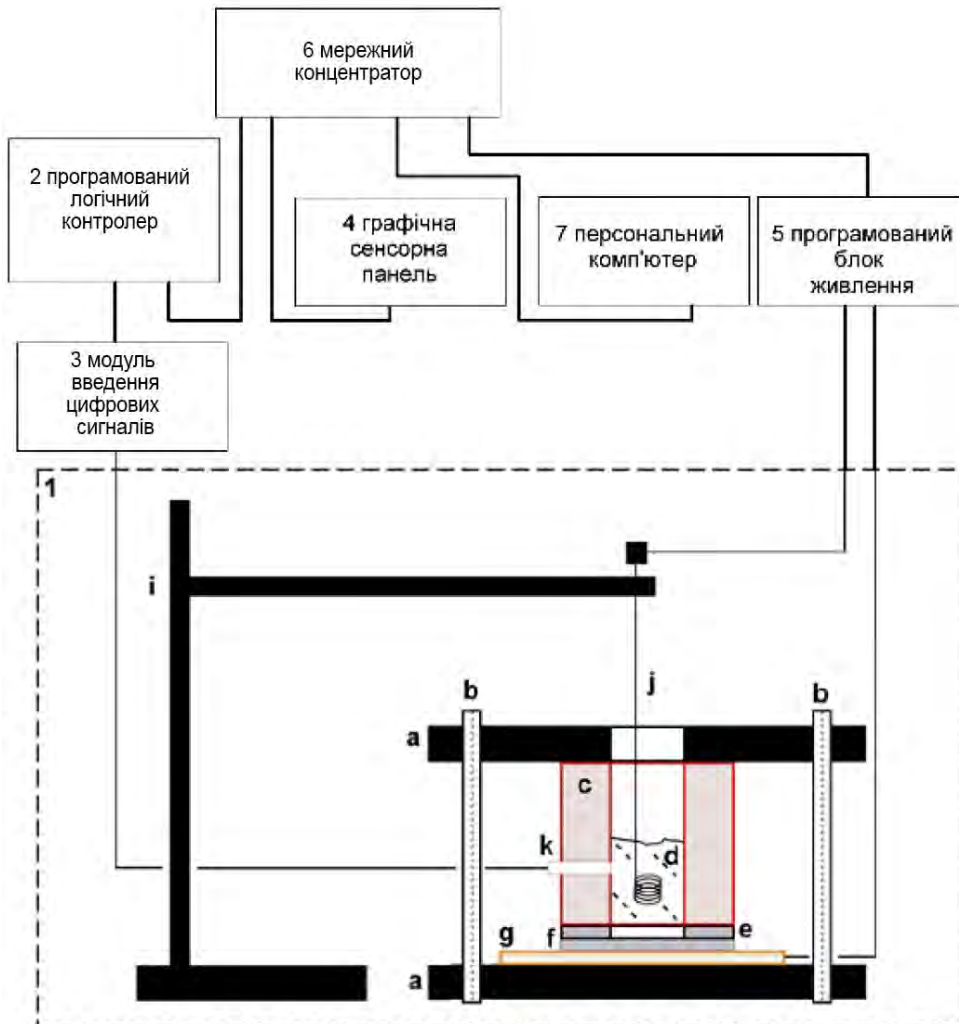


Рис. 1. Структурна схема системи керування вирощуванням поруватого шару:

a – затискачі; *b* – шпильки затискача; *c* – фторопластова комірка; *d* – електролітичний концентрат;
e – ізоляційна підкладка; *f* – пластина (зразок Si); *g* – омичний електрод; *i* – штатив;
j – платиновий електрод; *k* – цифровий сенсор температури

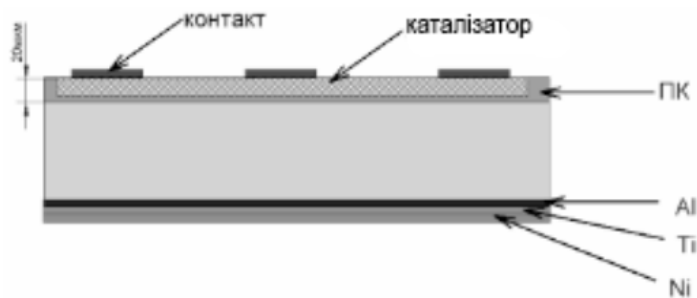


Рис. 2. Схема поруватого зразка кремнію з металевим каталізатором

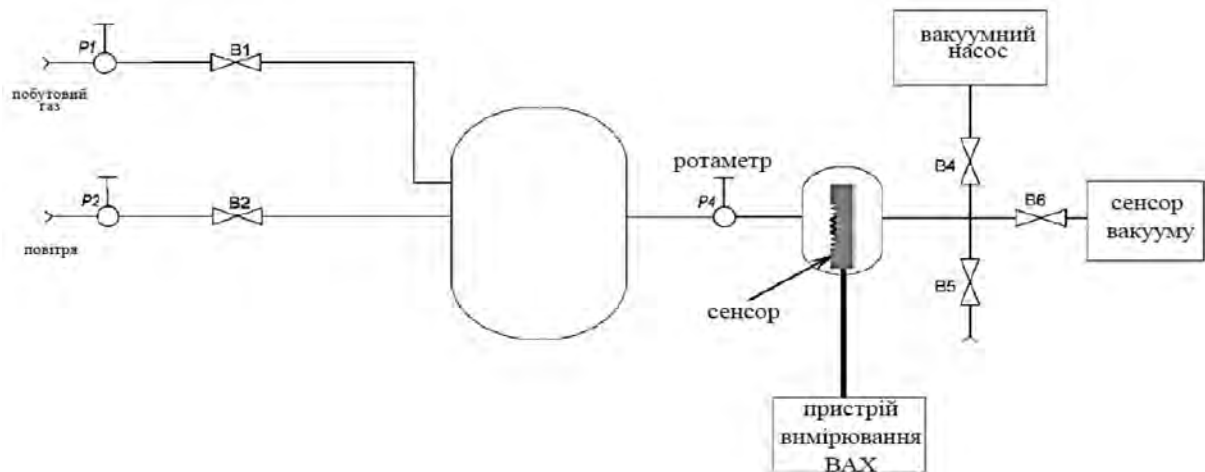


Рис. 3. Схема стенда для вимірювання вольт-амперних характеристик

Побутовий газ є сумішшю вуглеводнів, де більшу частку становить метан – від 92% до 98%. Побутовий газ також містить важчі вуглеводні – гомологи метану: етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}). Побутовий газ не має кольору та запаху. Щоб можна було визначити витік за запахом, у газ додають незначну кількість спеціальної речовини – одоранту. Як одорант застосовується етилмеркаптан у кількості 16 г на 1000 м^3 природного газу [13].

Оскільки метан становить більшу частину побутового газу, було досліджено вплив його

адсорбції до зразків $Me/PK-Ni/Si$. На рис. 4 подані ВАХ зразка за трьох температур: 23°C , 70°C , 150°C . З рисунка видно, що за кімнатної температури ВАХ структури має яскраво виражений "діодний" характер, а основну роль у провідності відіграє потенційний бар'єр на межі PK/Si [14]. "Прямому" напрямку відповідає негативна напруга на металевому електроді. Це означає, що фактором, який обмежує протікання струму в "прямому" напрямку, є інжекція дірок із кремнію в шар PK . Відповідно, зворотний струм обумовлений інжекцією електронів у шар PK із кремнію.

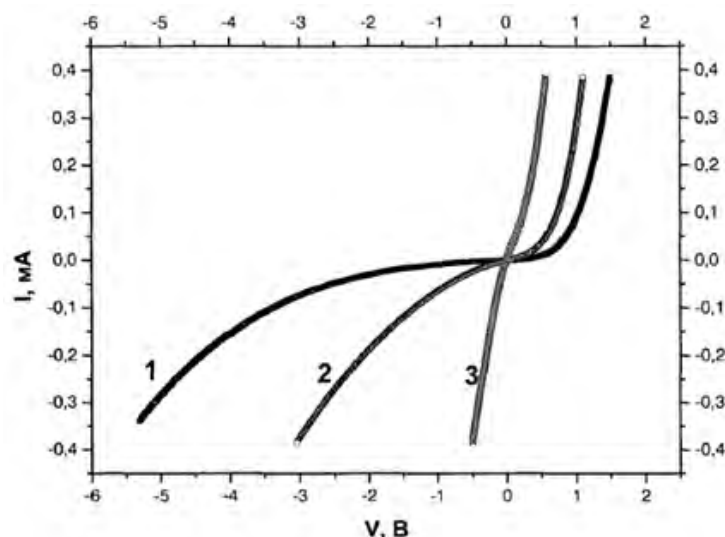


Рис. 4. ВАХ структури $Me/PK-Ni/Si$ у вакуумі за різних температур.

Умови вимірювання ВАХ: 1) $T = 23^\circ\text{C}$; 2) $T = 70^\circ\text{C}$; 3) $T = 150^\circ\text{C}$. Знак напруги відповідає напрузі на кремнії

На рис. 5 показано типові ВАХ досліджуваних структур у вакуумі та після напуску метану в експериментальну комірку, виміряні в різні

інтервали часу. На рис. 6 видно, що зміна величини відносної зміни струму через структуру $Me/PK-Ni/Si$ від напуску метану в експериментальну комірку

з досліджуваним зразком зростає з температурою немонотонно. За температур, менших за 60°C, ефект впливу адсорбції метану на струм через структуру відсутній, але, починаючи з 70°C, величина

відносної зміни струму через структуру стає відмінною від нуля, і швидкість її зростання максимальна за температур 100–150°C.

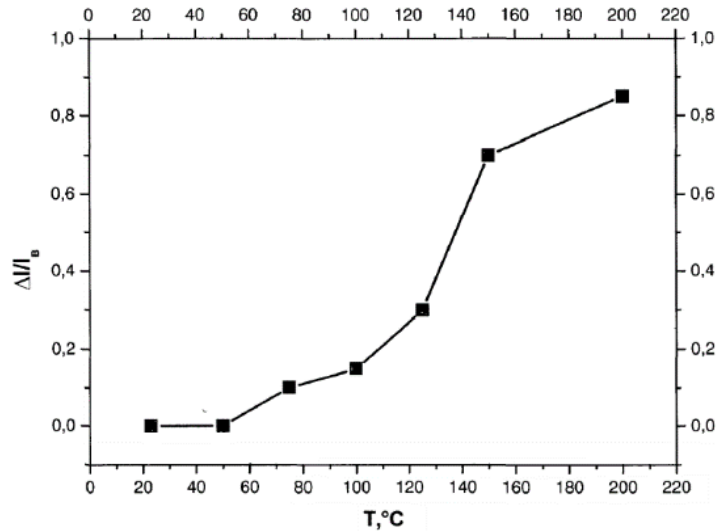


Рис. 5. Відносна зміна струму через структуру Me/ПК-Ni/Si під час адсорбції метану за різних температур.

Напруга на металевому електроді $V_g = 3,5$ В. $\Delta I = I_g - I_M$,

де I_g – величина струму у вакуумі; I_M – величина струму в атмосфері метану

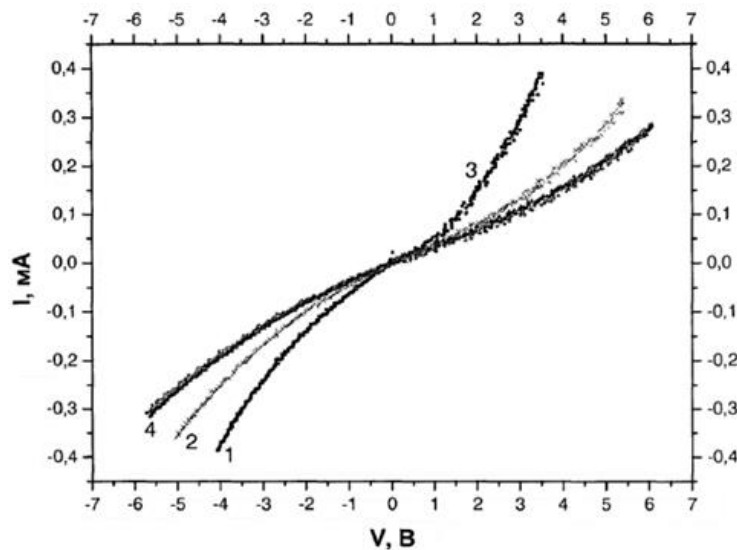


Рис. 6. Вплив метану на ВАХ структури Me/ПК-Ni/Si. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Тиск метану $p = 20$ торр.

Умови вимірювання ВАХ: 1) вакуум;

2) за 3 хв після напуску метану в комірку;

3) за 15 хв після напуску метану в комірку;

4) за 30 хв після напуску метану в комірку

Подальше нагрівання зразка до 200°C також призводить до збільшення впливу адсорбції метану на провідність зразка, але темп зростання відносної зміни струму значно зменшується, і можна припустити, що за температур значно вищих за 200°C ефект впливу адсорбції метану на провідність буде

стабільним. Це можна пояснити тим, що молекули метану за умови підвищення температури активно дисоціюють з утворенням водню, молекул типу CH_x ($0 < x < 4$) та їх різних проміжних сполук. Ці молекули хімічно більш активні та частіше впливають на зміну електрофізичних характеристик зразка.

Однак зі зростанням температури зменшується загальний темп адсорбції на поверхні ПК, тому величина відносної зміни струму через структуру Ме/ПК-Ni/Si під час адсорбції метану на поверхні зразка виходить на сталу величину за температури, що перевищує 200°C. Отже, можна вважати, що оптимальна температура для детектування метану структурами Ме/ПК-Ni/Si дорівнює 150°C. За цієї температури спостерігається помітна чутливість експериментальних структур до метану. Проте температура 150°C залишається набагато нижчою за робочі температури наявних напівпровідникових (металооксидних) датчиків.

За температури $T = 150^\circ\text{C}$ ВАХ стає симетричною щодо нуля напруги, і струм обмежений самим шаром ПК. Можна припустити, що за високої температури в ПК відбувається перехід електрона з валентної зони в метал, коли на затворі позитивна напруга. Тоді дірка, що утворилася, рухатиметься в протилежному напрямку з ПК/Si. Тобто можливий процес генерації носіїв заряду в ПК, і тому ВАХ стає симетричною щодо знака напруги. Виходячи з майже

квадратичної залежності струму від напруги, можна припустити, що пряму та зворотну гілку ВАХ утворюють струми, обмежені просторовим зарядом (ТОПЗ) у шарі ПК [15].

У цій роботі вивчався вплив побутового газу на ВАХ структур Ме/ПК-Ni/Si. Щоб унеможливити неминучий вплив парів води, побутовий газ попередньо осушували. Було встановлено, що за кімнатних температур побутовий газ не чинить помітного впливу на ВАХ зразка, а за температури $T = 150^\circ\text{C}$ спостерігається значний вплив адсорбції побутового газу на ВАХ системи Ме/ПК-Ni/Si. На рис. 7 зображено ВАХ зразка за напусків осушеного побутового газу в експериментальну комірку, а також за подальшого вакуумування зразка. На рис. 7 видно, що вплив адсорбції побутового газу на ВАХ зразка аналогічний впливу адсорбції метану. Тобто абсолютна величина струму як за позитивної, так і за негативної напруги на металевому контакті значно зменшується після напуску адсорбату в експериментальну комірку порівняно з вакуумом.

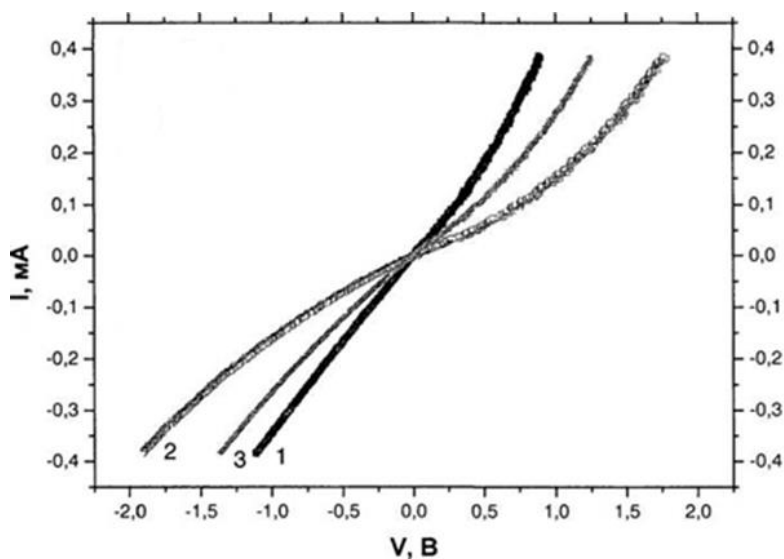


Рис. 7. Вплив адсорбції осушеного побутового газу на ВАХ структури Ме/ПК-Ni/Si. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$.

- Тиск побутового газу $p = 17$ торр. Умови вимірювання ВАХ: 1) вакуум;
2) за 30 хв після напуску побутового газу в комірку;
3) за 30 хв після вакуумування зразка

Однаковий вплив побутового газу та метану на ВАХ структури Ме/ПК-Ni/Si можна пояснити тим, що метан становить більшу частину побутового газу, а інші компоненти (етан, пропан, бутан) є його гомологами та схожі за хімічними властивостями. Наявність етилмеркаптану в складі побутового газу не чинить додаткового помітного впливу

на ВАХ зразка через мізерну малу частку цієї домішки $\sim 0,02$ ppm. Механізм чутливості побутового газу зводиться до механізму чутливості зразка до метану, де основна роль відводиться атомарному водню, що утворюється під час дисоціації вихідних вуглеводневих молекул у ділянці металічного контакту й на нанокластерах металу-каталізатора.

Під час проведення експериментів із напусками осушеного побутового газу постало питання про багаторазове використання структур $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ для детектування газів. Важливо простежити в динаміці, як швидко відновлюється провідність зразка в процесі відкачування газу з експериментальної комірки й наскільки вона змінюється за умови повторного напуску газу. Важливо визначити кількість таких ітерацій "напуск газу – відкачування", протягом яких ще можна розрізнити вплив адсорбції газу, що напускається, на провідність експериментальної структури.

На рис. 8 показано вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Напряга на металевому затворі $Vg = 1 \text{ В}$, температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$.

Адсорбційні експерименти з побутовим газом показали, що основна зміна провідності структури відбувається в перші кілька хвилин після напуску або відкачування газу з експериментального осередку, тому інтервал часу, упродовж якого зразок витримували в атмосфері побутового газу й у вакуумі, дорівнював 10 хв.

На рис. 8 видно, що протягом 10 хв в умовах першого напуску газу відбувається значне (майже удвічі) зменшення струму через зразок. Після вакуумування експериментальної структури величина струму збільшується, але його значення на 19% менше, ніж величина струму до першого напуску. Наступні напуски та відкачування побутового газу з комірки також супроводжуються значною зміною струму, до того ж у процесі кожного вакуумування зразка величина струму \sim на 11% менша, ніж величина струму під час попереднього вакуумування. Після п'ятого напуску адсорбату в експериментальну комірку та вакуумування структури величина струму через зразок приблизно дорівнює величині струму, що відповідає першому напуску газу в комірку. Необхідно зауважити, що відносна зміна струму зменшується незначно. Якщо після першого напуску побутового газу в комірку $\Delta I/I_0 = 0,48$, то після шостого – $\Delta I/I_0 = 0,3$. Щоб повністю відновити провідність структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ потрібне короткочасне прогрівання у вакуумі за $T \sim 200^\circ\text{C}$.

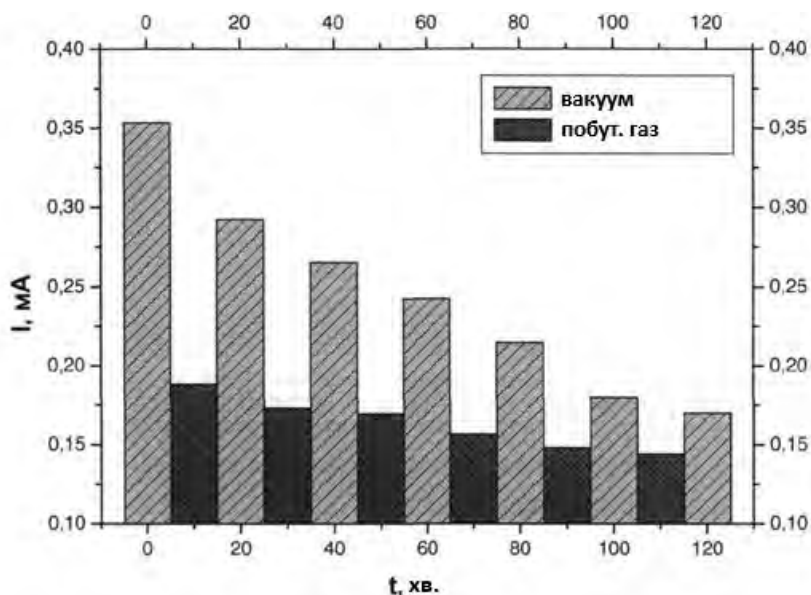


Рис. 8. Вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Напряга на металевому електроді $Vg = 1 \text{ В}$. Тиск побутового газу $p = 17 \text{ торр}$

Експерименти з осушеним побутовим газом показують, що структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ можуть бути використані в сенсорах для детектування побутового газу, і ці датчики здатні працювати багаторазово без додаткового оброблення.

Подані в роботі [14] результати показують, що адсорбція кисню на поверхні ПК призводить

до різноспрямованих ефектів від адсорбції метану. Незважаючи на те, що чутливість структури $\text{Me}/\text{ПК-Ni}/\text{Si}$ до молекул побутового газу зі зростанням температури збільшується, а до кисню, навпаки, зменшується [15], залишається незрозумілим, як змінюватиметься провідність зразка під час напуску метану в експериментальну комірку, якщо

до цього здійснити напуск атмосферного повітря та його не відкачувати з комірки.

Для з'ясування цього питання було проведено наступний експеримент. Спочатку зразок піддавався термовакуумному обробленню (ТВО), після якого в експериментальну комірку напускали атмосферне повітря за умови малого тиску. Температура зразка становила 150°C. Водночас спостерігалася зміна

ВАХ зразка. Після встановлення стабільної ВАХ проводився напуск побутового газу в експериментальну комірку та визначався його додатковий вплив на ВАХ зразка. Наприкінці експерименту зразок вакуумували понад годину для того, щоб дослідити відновлення провідності експериментальної структури. На рис. 9 показано кінетику зміни величини струму за напруги на металевому контакті $V_g = 2$ В.

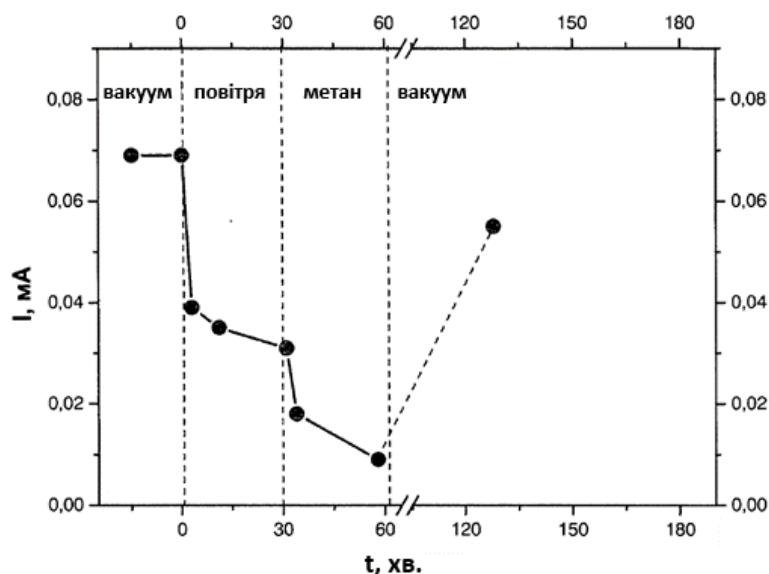


Рис. 9. Вплив адсорбції побутового газу на величину струму під час послідовних напусків і відкачування адсорбату. Температура зразка $T = 150^\circ\text{C}$. Напруга на металевому електроді $V_g = 1$ В. Тиск побутового газу $p = 17$ торр

З рис. 9 видно, що вплив адсорбції повітря призводить до зменшення величини струму. Тобто вплив адсорбції повітря на ВАХ експериментальної структури можна звести до впливу кисню як хімічно найактивнішої компоненти повітря. Хоча в повітрі є багато інших хімічно активних компонент, що впливають на електрофізичні властивості зразка, насамперед вуглекислий газ і водяна пара. Дуже важливим є той факт, що на тлі деякого зменшення величини струму після напуску повітря в камеру під час подальшого напуску побутового газу відбувається додаткове зменшення струму, до того ж адсорбційний ефект впливу побутового газу на провідність структури можна порівняти з адсорбційним ефектом від повітря. Тобто експериментальні структури за підвищеної температури здатні "відчувати" побутовий газ на тлі атмосферного повітря. Також важливо зазначити, що після вакуумування зразка відбулося часткове відновлення його провідності.

З усього сказаного вище можна зробити висновок, що структури Me/ПК-Ni/Si мають високу адсорбційну чутливість до молекул побутового газу і здатні його "відчувати" навіть на тлі атмосферного повітря.

Висновки

Виявлено значне збільшення чутливості структур на основі ПК до молекул метану й побутового газу за умови додавання в поруватий шар металу-катализатора (Ni). Уведення нанокластерів Ni призводить до більшого зростання чутливості до вуглеводнів. З'ясовано, що гетероструктурам Me/ПК-Ni/Si властива висока адсорбційна чутливість до різних газових середовищ, насамперед до таких вибухонебезпечних газів, як метан і побутовий газ. Показано, що мінімальна температура детектування метану та побутового газу значно нижча за робочі температури наявних напівпровідникових (металооксидних) сенсорів. Установлено, що механізм чутливості досліджених гетероструктур до молекул вуглеводнів не пов'язаний із впливом адсорбованого на поверхні ПК кисню. Визначено, що експериментальні структури здатні виявляти метан на фоні атмосферного повітря. Надалі планується отримати сенсори з іншими каталітичними металами (Pt, Pd, Au), а також дослідити селективність таких газів, як водень, вуглекислий газ, кисень тощо.

Список літератури

1. Levitsky I. A. Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors. *Sensors*. 15(8). 2015. P. 19968–19991. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819968>
2. Gor G. Y., Huber P., Bernstein N. Adsorption-induced deformation of nanoporous materials. *Applied Physics Reviews*. 2017. № 011303. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4975001>
3. Santana J. E., de Santiago F., Miranda Á., Pérez L. A., Salazar F., Trejo A., Cruz-Irisson M. Fluorinated porous silicon as a sensor material for environmentally toxic gases: a first-principles study. *Materials Advances*. 2021. P. 1072–1082. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MA00884B>
4. Kayahan E. Porous silicon-based CO₂ sensors with high sensitivity. *International Journal of Electronics and Optoelectronics*, 2018. 1(1). P. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.024>
5. Korotcenkov G., Rusu E. How to Improve the Performance of Porous Silicon-Based Gas and Vapor Sensors. Approaches and Achievements. *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201900348>
6. Когдась М. Г., Оксанич А. П., Холод О. Г., Притчин С. Е. Удосконалення методу отримання поруватого шару на підкладках n-GaAs. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Том 29 (68) № 6, частина 2. С. 228–234. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/44.pdf
7. Mhamdi H., Azaiez K., Fiorido T., Benabderrahmane Zaghouni R., Lazzari J. L., Bendahan M., Dimassi W. Room temperature NO₂ gas sensor based on stain-etched porous silicon: Towards a low-cost gas sensor integrated on silicon. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2022. V. 139. 109325 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109325>
8. Loni A., Defforge T., Caffull E., Gautier G., Canham L. T. Porous silicon fabrication by anodization: Progress towards the realization of layers and powders with high surface area and micropore content. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015. 209. P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.03.006>
9. Оксанич А., Когдась М., Холод О., Мащенко М. Розробка високочутливих датчиків водню на базі діодів Шотткі, виготовлених із нанорозмірних шарів n-GaAs. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2018. Вип. 2(109). С. 9–14. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.P.9-14
10. Ghorbani Shiraz H. Efficient room temperature hydrogen gas sensing based on graphene oxide and decorated porous silicon. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, 43(23). P. 15707–15717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.045>
11. Wang B., Zhang H., Phuong H. T., Jin F., Yang J. F., Ishizaki K. Gas permeability and adsorbability of the glass-bonded porous silicon carbide ceramics with controlled pore size. *Ceramics International*. 2014. 41(1). P. 1614–1620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.032>
12. Wang W., Gao Y., Tao Q., Liu Y. Z., Zuo J. J., Ju X. C., Zhang J. K. A Novel Porous Silicon Composite Sensor for Formaldehyde Detection. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 2015. V. 43, Issue 6. P. 849–855. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(15\)60829-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(15)60829-5)
13. Chang-Fang Wang, Mirikka P. Sarparanta Multifunctional porous silicon nanoparticles for cancer theranostics. *Biomaterials*. 2015. Vol. 48. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.01.008>
14. Choi M. S., Na H. G., Mirzaei A., Bang J. H., Oum W., Han S., Choi S. W., Kim M., Jin C., Kim S. S., Kim H. W. Room-temperature NO₂ sensor based on electrochemically etched porous silicon. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 811. 151975 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151975>
15. Su-Ran Li, Fang-Yi Huo, Han-Qi Wang Recent advances in porous nanomaterials-based drug delivery systems for cancer immunotherapy. *J Nanobiotechnology*. 2022. № 20. 277 p. DOI: 10.1186/s12951-022-01489-4

References

1. Levitsky, I. A. (2015), "Porous Silicon Structures as Optical Gas Sensors", *Sensors*, 15(8), P. 19968–19991. DOI: <https://doi.org/10.3390/s150819968>
2. Gor, G. Y., Huber, P., & Bernstein, N. (2017), "Adsorption-induced deformation of nanoporous materials", *Applied Physics Reviews*, 4, № 011303. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4975001>
3. Santana, J. E., de Santiago, F., Miranda, Á., Pérez, L. A., Salazar, F., Trejo, A., & Cruz-Irisson, M. (2021), "Fluorinated porous silicon as a sensor material for environmentally toxic gases: a first-principles study", *Materials Advances*, P. 1072–1082. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0MA00884B>
4. Kayahan, E. (2018), "Porous silicon-based CO₂ sensors with high sensitivity", *International Journal of Electronics and Optoelectronics*, 1(1), P. 24–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.03.024>
5. Korotcenkov, G., & Rusu, E. (2019), "How to Improve the Performance of Porous Silicon-Based Gas and Vapor Sensors. Approaches and Achievements", *Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science*. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201900348>
6. Kogdas, M., Oksanych, P., Kholod, G., Pritchyn, E. (2018), "Improvement of the method of creating contacts from the Schottky barrier to porous GaAs", *Scientific Notes of the Tauride National University named after V.I. Vernadsky*. Vol. 29 (68) No. 6, part 2, P. 228–234. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/44.pdf
7. Mhamdi, H., Azaiez, K., Fiorido, T., Benabderrahmane Zaghouni, R., Lazzari, J. L., Bendahan, M., & Dimassi, W. (2022), "Room temperature NO₂ gas sensor based on stain-etched porous silicon: Towards a low-cost gas sensor integrated on silicon", *Sensors and Actuators B: Chemical*. V. 139. 109325 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109325>

8. Loni, A., Defforge, T., Caffull, E., Gautier, G., & Canham, L. T. (2015), "Porous silicon fabrication by anodization: Progress towards the realization of layers and powders with high surface area and micropore content", *Microporous and Mesoporous Materials*, 209, P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.03.006>
9. Kogdas, M., Oksanych, P., Kholod, G., Mashenko, M. (2018), "Development of highly sensitive hydrogen sensors based on Schottky diodes made of nanoscale n-GaAs layers", *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 2(109) P. 9–14. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.P.9-14
10. Ghorbani Shiraz, H. (2017), "Efficient room temperature hydrogen gas sensing based on graphene oxide and decorated porous silicon", *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(23), P. 15707–15717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.045>
11. Wang, B., Zhang, H., Phuong, H. T., Jin, F., Yang, J. F., & Ishizaki, K. (2014), "Gas permeability and adsorbability of the glass-bonded porous silicon carbide ceramics with controlled pore size", *Ceramics International*, 41(1), P. 1614–1620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.032>
12. Wang, W., Gao, Y., Tao, Q., Liu, Y. Z., Zuo, J. J., Ju, X. C., & Zhang, J. K. (2015), "A Novel Porous Silicon Composite Sensor for Formaldehyde Detection", *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 43(6), P. 849–855. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(15\)60829-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(15)60829-5)
13. Chang-Fang Wang, Mirkka P. (2015), "Sarparanta Multifunctional porous silicon nanoparticles for cancer theranostics", *Frontiers in Chemistry*, Vol. 48, P. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.01.008>
14. Choi, M. S., Na, H. G., Mirzaei, A., Bang, J. H., Oum, W., Han, S., Choi, S. W., Kim, M., Jin, C., Kim, S. S., & Kim, H. W. (2019), "Room-temperature NO₂ sensor based on electrochemically etched porous silicon", *Journal of Alloys and Compounds*. V. 811. 151975 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151975>
15. Su-Ran Li, Fang-Yi Huo, Han-Qi Wang (2022), "Recent advances in porous nanomaterials-based drug delivery systems for cancer immunotherapy", *J Nanobiotechnology*, 20. 277 p. DOI: 10.1186/s12951-022-01489-4

Надійшла 28.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Когдась Максим Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем, Кременчук, Україна; e-mail: kogdasmax@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7208-2680>

Kogdas Maksym – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Associate Professor at the Department of Automation and Information Systems, Kremenchuk, Ukraine.

STUDY OF ADSORPTION OF HOUSEHOLD GAS MOLECULES ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF POROUS SILICON

Purpose. This research comprehensively investigates the adsorption of household gas molecules on porous silicon surfaces and its impact on the electrophysical properties of the material. The primary aim is to understand how the adsorption process influences the electrical conductivity and capacitance of porous silicon. **Methodology.** The study employs various electrophysical analysis methods to measure changes in the material's conductivity and capacitance caused by gas adsorption. Furthermore, the research explores optimal conditions for detecting household gas and establishes the correlation between the degree of adsorption and alterations in electrophysical parameters. **Originality.** The research contributes novelty by not only revealing increased conductivity due to adsorption but also significant changes in capacitance, providing a foundation for developing efficient gas sensors. Additionally, the article discusses the potential applications of porous silicon in developing novel materials for gas sensors to detect various airborne pollutants. **Results.** In addition to the previously mentioned findings, the article highlights the results of experiments studying the influence of different concentrations of household gas on the electrophysical characteristics of porous silicon. This insight refines optimal parameters for the effective detection of gas pollutants. The research also discusses the applicability of the results in producing environmentally friendly and highly efficient sensor systems. **Practical Value.** The obtained conclusions deepen our understanding of the interaction between porous silicon and household gas, crucial for advancing gas sensor technologies. The study opens broad possibilities for applying porous silicon in highly sensitive and reliable gas sensors for diverse practical applications, including safety monitoring and air quality control in industrial and domestic settings. The practical implications extend to the development of real-time, eco-friendly sensor systems.

Keywords: porous silicon; adsorption; household gas; electrical conductivity; dielectric permeability; methane, sensors.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Когдась М. Г. Дослідження адсорбції молекул побутового газу на електрофізичні властивості поруватого кремнію. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1 (27). С. 246–255. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.246>

Kogdas, M. (2024), "Study of adsorption of household gas molecules on electrophysical properties of porous silicon", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (27), P. 246–255. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.246>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Ащепков В. О.	236
Багаєв І. О.	215
Волк М. О.	5
Гавриленко О. В.	18
Гобов Д. А.	26
Гора М. В.	5
Дудар З. В.	39
Євсєєв В. В.	154
Журило О. Д.	54
Закутній С. В.	96
Замрій І. В.	67
Зась Д. С.	226
Зачко О. Б.	204
Катрич О. О.	215
Кириченко І. В.	164
Клименко О. М.	154
Когдась М. Г.	246
Козирєв А. Д.	81
Коптілов Н. С.	128
Корнієнко В. Р.	192
Косиченко О. М.	215
Кузнєцов В. Д.	226
Литвин В. В.	109
Літвін С. Г.	39
Ляшенко О. С.	54
Максимова С. С.	154
Малєєв Л. В.	179
Матвієнко О. І.	96
Матківська Х. С.	204
Мацелюх Ю. Р.	109
Мінухін С. В.	128
М'який М. Ю.	18
Нарожний В. В.	140
Невлюдов І. Ш.	154
Рахліс Д. Ю.	192
Рибальченко Т. П.	226
Рожнова Т. Г.	192
Терещенко Г. Ю.	164
Теслов О. А.	215
Фатєєва Л. Ю.	226
Федорович О. Є.	179
Філіпенко І. В.	192
Харченко В. С.	140
Черняк О. М.	215
Черняк О. М.	226
Шахматов І. О.	67
Шевченко В. П.	215
Шевченко Н. Ю.	26
Шкіль О. С.	192
Шубін І. Ю.	81
Яковлев М. Ю.	226

ALPHABETICAL INDEX

Aschepkov Valeriy	236
Bahaiev Ihor	215
Volk Maksym	5
Gavrilenko Olena	18
Gobov Denis	26
Hora Maksym	5
Dudar Zoia	39
Yevsieiev Vladyslav	154
Zhurylo Oleh	54
Zakutnii Serhii	96
Zamrii Iryna	67
Zas Denys	226
Zachko Oleh	204
Katrych Oleh	215
Kyrychenko Iryna	164
Klymenko Oleksandr	154
Kogdas Maksym	246
Kozyriev Andrii	81
Koptilov Nikita	128
Korniienko Valentyn	192
Kosychenko Olha	215
Kuznietsov Valerii	226
Lytvyn Vasyl	109
Litvin Svitlana	39
Liashenko Oleksii	54
Maksymova Svitlana	154
Malieiev Leonid	179
Matviienko Olha	96
Matkivska Khrystyna	204
Matseliukh Yurii	109
Minukhin Serhii	128
Myagkyi Mykhailo	18
Narozhnyi Volodymyr	140
Nevliudov Igor	154
Rakhlis Dariia	192
Rybalchenko Tetiana	226
Rozhnova Tetiana	192
Tereshchenko Glib	164
Teslov Oleksandr	215
Fatieieva Lina	226
Fedorovych Oleg	179
Filippenko Inna	192
Kharchenko Vyacheslav	140
Cherniak Olena	215
Cherniak Olena	226
Shakhmatov Ivan	67
Shevchenko Viacheslav	215
Shevchenko Natalia	26
Shkil Alexander	192
Shubin Ihor	81
Yakovlev Maxym	226

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

Щоквартальний науковий журнал

№ 1 (27), 2024

Відповідальний секретар журналу *І.Г. Перова*
Відповідальний за випуск *А.А. Коваленко*
Відповідальний за ліцензування *В.В. Косенко*
Редактор *Л.В. Кузьміна*
Комп'ютерна верстка *Л.Ю. Светайло*

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 20,1.
Тираж 150 прим.

Віддруковано з готових оригінал-макетів
в типографії ФОП Андреев К.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб
та фізичних осіб-підприємців.
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com

SCIENTIFIC PUBLICATION

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

Quarterly scientific journal

№ 1 (27), 2024

Responsible secretary of journal *I. Perova*
Responsible for release *A. Kovalenko*
Responsible for licensing *V. Kosenko*
Editor *L. Kuzmina*
Computer layout *L. Svietailo*

Format 60×84/8. Conventional printed sheets 20,1.
Edition of 150 copies.

Printed from ready-made original layouts
in the printing house
of Individual Entrepreneur Andreev K.V.
Unified State Register of Legal Entities
and Individual Entrepreneurs.
Entry No. 24800170000045020 of 30.05.2003.

fl. 50, 9, Acad. Bogomolets Str., Kharkiv, 61157,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com