



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



Kharkiv National University of Radio Electronics
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

Щоквартальний науковий журнал

№ 3 (29), 2024

Затверджений до друку
Науково-технічною Радою
Харківського національного університету радіоелектроніки
(Протокол № 9 від 26 вересня 2024 р.)

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

Quarterly scientific journal

No. 3 (29), 2024

Approved for publication
by the Scientific and Technical Council
of the Kharkiv National University of Radio Electronics
(Protocol No. 9 d.d. 26 September 2024)

ESTABLISHERS

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

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

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

Ідентифікатор медіа R30-03878

Витяг з реєстру суб'єктів у сфері медіа – реєстрантів від 25.04.2024 № 1410

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)

Харків – 2024

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Бодянський 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:

Артюх Роман Володимирович, канд. техн. наук;
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);
Гопєєнко Віктор, д-р техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);

Зайцева Єсна, д-р техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р техн. наук, професор;
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;
Музика 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, професор;
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);
Сетлак Галина, д-р техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р техн. наук, професор (Фінляндія);
Телєтов 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.

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), Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oлександр, 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), Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Estonia);
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);
Iastremska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine)

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Калашнікова В. І.**
Застосування похідних та інтегральних кінцевих режимів
у системах типу "лідер – послідовник" (ua)
- 15 **Кікоть М. С., Малєєва Ю. А.**
Моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки (ua)
- 29 **Коменчук О. В.**
Адаптивні методи попереднього оброблення
для підвищення точності сегментації стоматологічних рентгенівських знімків (ua)
- 39 **Нафієв А. Е., Родіонов А. М.**
Архітектура автоматизованого програмного комплексу на основі
багатоядерного SVM-класифікатора для аналізу шкідливих виконуваних файлів (en)
- 48 **Невлюдов І. Ш., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С.,
Білоусов М. Ю., Шибанов С. В., Рамал Ю.**
Розроблення моделі процесу розвитку виробничих дефектів
у засобах автоматизації (ua)
- 57 **Пономаренко О. Є., Горбачов В. О.**
Метод обфускації проекту електронних систем на основі агрегації (ua)
- 64 **Посашков О. Ю., Цимбал О. М.**
Розроблення архітектури системи віддаленого доступу до навчального
лабораторного обладнання з використанням автоматизованих рішень (ua)
- 76 **Радівілова Т. А., Кіріченко Л. О., Пантєлєєв В. О., Мазєпа А. Д., Білодід В. Г.**
Аналіз методів автентифікації для вебзастосунків та реалізація вебзастосунку
з інтегрованою системою автентифікації (ua)
- 91 **Тереник Д., Харченко В. С.**
Вибір стратегій розгортання і забезпечення надійності рою БпЛА
для підтримки комунікацій в умовах руйнувань (ua)

Сучасні технології управління підприємством

- 104 **Ястремська О. М., Малярець Л. М., Самойленко В. В., Бударін О. С.**
Управління інноваційними проєктами
для забезпечення інноваційного розвитку підприємств (en)

Телекомунікаційні системи та комп'ютерні мережі

- 121 **Ярещенко В. В., Косенко В. В.**
Метод кодування з низьким енергоспоживанням у системах передачі даних (ua)
- 130 **Алфавітний покажчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Kalashnikova V.**
Application of derivative and integral terminal sliding modes
in leader-follower type systems (ua)
- 15 **Kikot M., Malieieva Y.**
Models of forming logistics infrastructure for complex equipment recycling" (ua)
- 29 **Komenchuk O.**
Adaptive pre-processing methods for increasing the accuracy
of segmentation of dental X-RAY images (ua)
- 39 **Nafiev A., Rodionov A.**
Architecture of an automated program complex based on a multiple kernel SVM classifier
for analyzing malicious executable files (en)
- 48 **Nevliudov I., Starodubcev N., Makarenko H., Bilousov M., Shybanov S., Ramal Y.**
Development of a model of the process of development
of manufacturing defects in automation means (ua)
- 57 **Ponomarenko O., Gorbachov V.**
Aggregation-based obfuscation method for electronic systems design (ua)
- 64 **Posashkov O., Tsybal O.**
Development of the architecture of the remote access system
to educational laboratory equipment using automated solutions (ua)
- 76 **Radivilova T., Kirichenko L., Pantelieiev V., Mazepa A., Bilodid V.**
Analysis of authentication methods for full-stack applications and implementation
of a web application with an integrated authentication system (ua)
- 91 **Terenyk D., Kharchenko V.**
Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability
of a UAV swarm to support communications in destruction conditions (ua)

Modern Enterprise Management Technology

- 104 **Iastremska O., Malyarets L., Samoilenko V., Budarin O.**
Management of innovative projects to ensure innovative development of enterprises (en)

Telecommunication Systems & Computer Network

- 121 **Yareshchenko V., Kosenko V.**
Low-power coding method in data transmission systems (ua)
- 130 **Alphabetical index**

В. КАЛАШНІКОВА

ЗАСТОСУВАННЯ ПОХІДНИХ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ КІНЦЕВИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ ТИПУ "ЛІДЕР – ПОСЛІДОВНИК"

Предмет дослідження – методи управління роями роботів типу *dr20*, зокрема похідного та інтегрального ковзного режиму управління, у поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень. Проблема ефективного управління роєм роботів є актуальною в сучасних умовах автоматизації та роботизації, особливо в контексті виконання складних завдань у разі обмеженого простору та наявності збурень. **Мета роботи:** розроблення та аналіз імітаційної моделі руху рою роботів з упровадженням удосконалених методів управління для забезпечення точності та стабільності системи. Дослідження спрямоване на вдосконалення методів керування роями роботів, що дає змогу покращити їх ефективність і надійність за різних умов експлуатації. **Завдання:** 1) розробити імітаційну модель рою роботів у середовищі *CoppeliaSimEDU*, що бере до уваги всі необхідні параметри для моделювання реальних умов експлуатації; 2) реалізувати алгоритми керування для лідера й послідовників, що забезпечують збереження структури рою та уникнення зіткнень; 3) провести серію експериментів для перевірки ефективності запропонованих методів, зокрема проаналізувати результати щодо стабільності й точності управління. **Методи:** моделювання в *CoppeliaSimEDU*, реалізація алгоритмів керування на основі похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління, застосування нелінійного спостерігача збурень для поліпшення стабільності системи. Застосовані методи дають змогу зважати на вплив різних збурень і забезпечують високу точність управління. **Результати дослідження.** Запропонована модель управління допомагає досягти високої точності слідування та уникнення зіткнень, навіть у складних умовах. Експерименти показали, що методи керування забезпечують стабільність і точність руху рою роботів, зменшуючи час реакції на зовнішні збурення. Результати дослідження демонструють, що використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління в поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень дає змогу значно підвищити ефективність багатороботних систем. **Висновки.** Упровадження вдосконалених методів управління значно підвищує ефективність багатороботних систем, забезпечуючи їх надійність і точність у реальних умовах експлуатації. Запропоновані методи можуть бути застосовані в різних сферах, де необхідна координація руху значної кількості роботів, зокрема в логістиці, рятувальних операціях і моніторингу довкілля.

Ключові слова: робототехніка; системи управління; надійність; стабільність; автоматизація; ковзний режим; спостерігач збурень; багатороботні системи.

Вступ

Розвиток багатороботних систем і методів їх управління є важливим напрямом сучасної робототехніки, що має широкий спектр застосування – від промислової автоматизації до інтелектуальних транспортних систем. Одним із найбільш перспективних підходів до керування роями роботів є метод "лідер – послідовник", де один робот є лідером, а інші пристрої прямують за ним, орієнтуючись на його положення та траєкторію руху.

Такий підхід дає змогу ефективно координувати рух значної кількості роботів, забезпечуючи високу точність і стабільність системи загалом. Однак для реалізації цього підходу необхідні ефективні методи керування, які б уможливили рух за лідером з мінімальними відхиленнями, навіть за присутності зовнішніх збурень і непередбачуваних змін у навколишньому середовищі.

У цьому дослідженні пропонується використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму управління в поєднанні з нелінійним спостерігачем збурень для забезпечення точності та стабільності руху рою роботів. Також розглядається ймовірність застосування глобальної інформації для регулювання поведінки "послідовників", що дає змогу підвищити адаптивність системи до зовнішніх умов.

Основною метою дослідження є розроблення та аналіз імітаційної моделі руху рою роботів на основі методу "лідер – послідовник" із використанням запропонованих методів управління. Модель реалізована в середовищі *CoppeliaSimEDU*, що допомагає проводити детальне моделювання та тестування алгоритмів керування в різних умовах.

Запропонована модель управління перевіряється на прикладі трьох роботів *dr20*, один з яких є лідером, а два інших – послідовниками. Для аналізу

ефективності методів проводяться експерименти, результати яких демонструють точність і стабільність системи в разі динамічних змін та зовнішніх збурень.

Дослідження спрямоване на вдосконалення методів управління багатороботними системами, що сприятиме підвищенню ефективності їх використання в різних галузях та водночас забезпечує надійність і точність виконання завдань у складних умовах [1].

Огляд останніх досліджень та публікацій у координації багатороботних систем із термінальним ковзанням

Останні роки принесли значний прогрес у розробленні та впровадженні новітніх методів управління для багатороботних систем. Особливо активні дослідження у сфері термінального ковзання в архітектурах "лідер – послідовник", спрямованих на підвищення точності та надійності роботи систем в умовах великої невизначеності.

Дослідження Д. Цянь та І. Сі (2018), опубліковане в *Applied Sciences*, вивчало маневри формації "лідер і послідовник" з використанням похідного та інтегрального термінального ковзного режиму. Автори розробили математичну модель, що дає змогу моделювати динаміку такої системи, зокрема вхідно-вихідні рівняння, які демонструють взаємодію між лідером і послідовниками. Система впровадження контролерів основана на визначенні ступеня відносності системи формації "лідер – послідовник". Це дослідження також наголошує на застосуванні нелінійного спостерігача збурень для розв'язання проблем невизначеностей, що значно покращує стабільність системи, як підтверджено з допомогою аналізу Ляпунова та числових симуляцій [1].

У 2019 році та сама команда дослідників разом із Г. Чжаном, Дж. Ченом, Дж. Ваном та З. Ву розширила свої експерименти, запропонувавши методику суперскручування, основану на ковзному режимі управління, для покращення адаптивності та стійкості багатороботних систем у динамічних умовах. Цей метод містить два адаптивні коефіцієнти, що дають змогу системі краще реагувати на зміни та збурення. Закрите коло стабільності формації було теоретично підтверджено на основі принципів Ляпунова, а практична ефективність методу була доведена за допомогою числових симуляцій [2].

М. Насір та А. Майті (2024) опублікували дослідження в *Machines*, що зосереджується

на стійкості багатороботних систем під час візантійських атак, застосовуючи адаптивний ковзний режим. Автори розробили адаптивну стратегію консенсусного контролю, що допомагає системі впоратися з візантійськими атаками, підтверджуючи стійкість системи в умовах таких атак за допомогою аналізу Ляпунова [3].

М.З.А. Рашид та інші (2019) провели всебічний огляд контролерів для роботних систем "лідер – послідовник", аналізуючи різні стратегії керування, зокрема термінальний ковзний режим. Результати опубліковано в *Journal of Systems and Control Engineering* [4].

Крім того, Д. Цянь, С. Тонг, Дж. Го та СГ Лі (2015) розробили координовану схему управління для неголономних мобільних роботів, використовуючи інтегральний ковзний режим для подолання невідповідних невизначеностей та підвищення стабільності формації [5].

Ці дослідження вказують на тривалу актуальність і важливість розроблення та впровадження адаптивних і надійних методів керування для багатороботних систем, особливо в умовах високої невизначеності та потенційних зовнішніх загроз.

Нерозв'язані проблеми та мета дослідження

У сучасних багатороботних системах типу "лідер – послідовник" існує кілька нерозв'язаних проблем, що викликають необхідність у подальшому науковому дослідженні. Одним із таких питань є збереження оптимальних просторових відношень між лідером і послідовниками за змінних динамічних умов та невизначеності. Наприклад, у разі зміни швидкості чи напрямку руху лідера послідовники мають швидко й точно адаптуватися для підтримання необхідної формації. Іншими словами, управління рухом послідовників має бути здатне ефективно реагувати на зміни умов у реальному часі.

Ця проблема стає особливо актуальною в контексті застосування багатороботних систем у різних сферах, таких як розумні транспортні системи, моніторинг довкілля або рятувальні операції. Нестабільні умови можуть виникати через мінливі погодні умови, перешкоди на шляху руху або непередбачені дії інших об'єктів у середовищі. Тому розроблення методів, що забезпечують стабільність і надійність роботи багатороботних систем у таких умовах, є важливим завданням наукової спільноти.

Метою нашого дослідження є розроблення та апробація ефективного методу зменшення відстані в системі "лідер – послідовник" за допомогою впровадження похідних та інтегрованих кінцевих режимів управління. Основні завдання цього дослідження:

1) розроблення кінематичної моделі системи. Плануємо створити математичну модель, яка бере до уваги основні просторові відношення між лідером і послідовниками, щоб уникнути порушень формації та забезпечити точний маршрут. Це дасть змогу послідовникам ефективно реагувати на зміни положення лідера та забезпечить стабільність формації в умовах невизначеності;

2) упровадження похідних та інтегрованих кінцевих режимів управління. Пропонуємо впроваджувати ці методи для забезпечення стабільного та точного руху послідовників за лідером, навіть у разі невизначеності та змін динамічних умов. Це дасть змогу більш ефективно керувати рухом групи роботів і забезпечить підтримку необхідних формацій, зокрема в складних ситуаціях;

3) вивчення впливу впровадження нових методів управління. Плануємо дослідити, як застосування похідних та інтегрованих кінцевих режимів впливає на зменшення відстані між завданнями в багатороботних системах. Це дасть змогу оцінити ефективність і придатність запропонованих методів у реальних умовах використання;

4) порівняння ефективності нового методу. Збираємося порівняти ефективність запропонованого методу з наявними підходами управління для систем типу "лідер – послідовник", щоб визначити його переваги та можливі обмеження. Це дасть змогу визначити оптимальний підхід до управління багатороботними системами в разі зміни динамічних умов і невизначеності.

Матеріали й методи

На рис. 1 зображений робот, схожий на одноколісний велосипед, у горизонтальній площині. Його два паралельні колеса мають одну й ту саму вісь і керуються незалежно двома постійними струмовими двигунами. Робот може одночасно обертатися й рухатися, що описано рівнянням:

$$q = [xy\theta]^T. \quad (1)$$

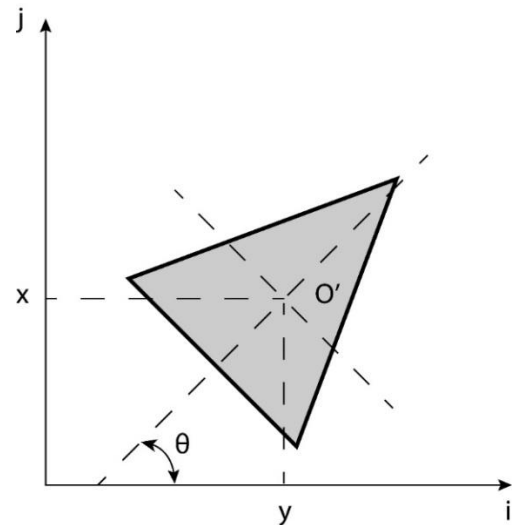


Рис. 1. Кресленник мобільного робота

В (1) (xy) розташований у центрі робота і є його поступальними координатами, а θ позначає його обертальну координату. Щоб знати положення, на передньому колесі робота встановлений датчик позиціонування, як показано на рис. 1. Вісь датчика ортогональна осі двох коліс.

$$q_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де v_n та ω_n – лінійна та кутова швидкості відповідно. Динамічна модель для n -го робота, що бере до уваги коливання параметрів, невизначеності моделі та зовнішні збурення:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_n \\ \ddot{y}_n \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{y}_n \\ \dot{x}_n \\ \dot{\theta}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot u_n + \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta u_n + \pi_n q_n, \quad (3)$$

де $\Delta u_n = [\alpha_n \beta_n]^T$ – вхідний сигнал керування для n -го робота; α_n та β_n – відповідно, прискорення та кутове прискорення. Вони описуються $\alpha_n = F_n/m_n$ та $\beta_n = \tau_n/J_n$, де F_n, m_n, τ_n та J_n , відповідно, є силою, номінальною масою, крутним моментом і номінальним моментом інерції робота [2].

Колівання параметрів позначені як

$$\Delta_n = \begin{bmatrix} \varepsilon_n & 0 \\ 0 & \varepsilon'_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де ε_n та ε'_n – параметри маси та моменту інерції робота, які можуть змінюватися залежно від умов руху.

Пропонуємо кінематичну модель системи формування "лідер – послідовник" (рис. 2). Система містить робота-лідера та кількох послідовників: i – робот, який є лідером; k – робот-послідовник [8]. Визначимо відносну відстань l_{ik} та кутовий курс φ_{ik} , важливі для підтримання бажаних просторових відношень

$$l_{ik} = \sqrt{[x_i - \bar{x}_k]^2 + (y_i - \bar{y}_k)^2}. \quad (5)$$

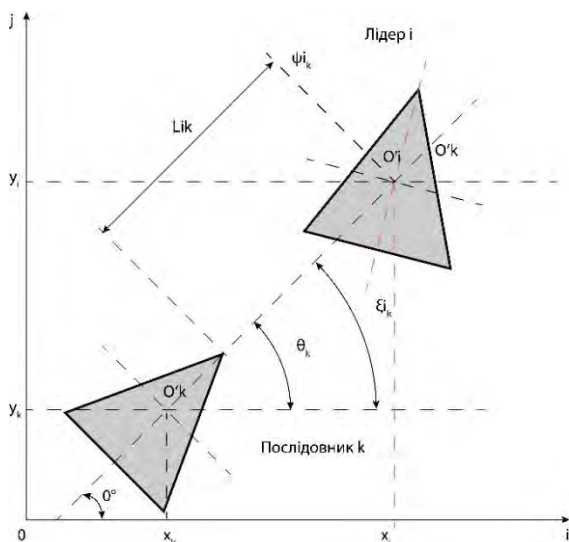


Рис. 2. Креслення координованої структури "лідер – послідовник"

Координати (x_k, y_2) обчислюються як $x_k = x_i + r \cos(\theta)$ та $y_k = y_i + r \sin(\theta)$. Одночасно φ_{ik} сформульовано як $\varphi_{ik} = \pi + \zeta_{ik} - \theta_i$, де θ_i позначає кут орієнтації робота-лідера i ; $\zeta_{ik} = \arctan \frac{y_i - y_k r \sin \theta_i}{x_i - x_k r \cos \theta_k}$.

Для спрощення процесу слідування роботів-послідовників за лідером з бажаною відстанню та кутом додається контролер ковзання з похідною та інтегральним терміналом. Мета контролера – уникнути зіткнень, підтримувати зв'язок без затримок і забезпечувати, щоб кожен послідовник мав інформацію про своє положення, швидкість та деталі лідера. Динамічна модель має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{ik} &= f(x_{ik}, d_{ik}(t)) + B_{ik} u_k, \\ y_{ik} &= h(x_{ik}) \end{aligned} \quad (6)$$

де f – динамічні рівняння та $d_{ik}(t)$ зважає на невизначеності. Конкретні вирази для матриць і змінних тут не наводяться через обмеження обсягу статті. Динамічний режим (6) системи формування "лідер – послідовник" дає відносний ступінь, що обчислюється так:

$$L_f h_1(x_{ik}) \frac{\partial h_1(x_{ik})}{\partial x} f(x_{ik}, d_{ik}), \quad (7)$$

$$L_f h_2(x_{ik}) \frac{\partial h_2(x_{ik})}{\partial x} f(x_{ik}, d_{ik}), \quad (8)$$

$$L_{B_{ik,1K}} L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}) = L_{B_{ik,1K}} (L_f h_1(x_{ik}, d_{ik})) = \frac{\partial (L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}))}{\partial x_{ik}} \cdot B_{ik,1K}, \quad (9)$$

$$L_{B_{ik,1K}} L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}) = L_{B_{ik,1K}} (L_f h_2(x_{ik}, d_{ik})) = \frac{\partial (L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}))}{\partial x_{ik}} \cdot B_{ik,1K}, \quad (10)$$

l_{ik} – похідні $L_{B_{ik,1K}}$ визначаються за допомогою рівнянь (9) та (10); r_K (де $K=1,2$) є найменшим цілим числом, що забезпечує принаймні один керувальний вхід $u_{r_K}^f$ (де $K=1,2$).

$$\dot{y}_{r_1} = L_{r_1} f h_1(x_{ik}) + m \sum_{K=1}^{r_1} L_{B_{ik,K}} K L_f h_1(x_{ik}, d_{ik}) u_k, \quad (11)$$

$$\dot{y}_{r_2} = L_{r_2} f h_2(x_{ik}) + m \sum_{K=1}^{r_2} L_{B_{ik,K}} K L_f h_2(x_{ik}, d_{ik}) u_k, \quad (12)$$

де $r_1 = r_2 = 2$ та $m = 2$.

Рівняння динаміки вхід-вихід подано так:

$$\ddot{y}_{ik} = d_{ik} + H(x_{ik}, d_{ik}) u_{ik}, \quad (13)$$

де $d_{ik} = L_{ik}(I_3 + \Delta_i) u_i + P_{ik} + F_{ik}$, $H(x_{ik}, d_{ik}) = G_{ik}(I_4 + \Delta_k)$, I_3 та $I_4 = 2 \times 2$ матриці, та u_i є вхідним сигналом керування i -го робота.

$$\delta_{ik} I \leq \delta_{ik}^{-1} I. \quad (14)$$

$H(x_{ik}, d_{ik})$ має нормальну частину G_{ik} та нелінійну частину $G_{ik} \Delta_i$, які задовольняють умову $\delta_{ik} < 1$, вказану в рівнянні (14).

Відповідні невизначеності $(G_{ik} \Delta_k u_k)$ є коливаннями параметрів послідовника робота k . d_{ik} позначає невідповідні невизначеності в системі формування "лідер – послідовник", яка містить

три частини. F_{ik} та P_{ik} позначають невизначеності моделі та зовнішні збурення, спричинені ковзанням, тертям, перешкодами тощо, які важко узгодити.

1. Проектування ковзного режиму та його динаміка

Описує розроблення ковзного режиму керування, що використовується для забезпечення стабільності й точності формування роботів. Ковзний режим допомагає мінімізувати вплив зовнішніх збурень і невизначеностей параметрів моделі, забезпечуючи високу точність слідування за заданими траєкторіями [9].

Розроблення ковзного режиму керування починається з визначення слайдингової поверхні s , що формулюється як

$$s = C(x - x_d), \quad (15)$$

де x – стан системи; x_d – бажаний стан; C – матриця керування, яка добирається таким чином, щоб забезпечити бажані динамічні властивості системи.

Далі динамічні рівняння системи можна виразити так:

$$\dot{s} = A_s s + B_s u, \quad (16)$$

де A_s, B_s – похідні матриці, що залежать від параметрів системи та обраної структури керування.

2. Проектування ковзного режиму з адаптивним посиленням ковзного режиму

Розробляється метод керування з адаптивним посиленням ковзного режиму, що покращує роботу системи в умовах невизначеності та динамічних збурень. Метод сприяє оптимізації відгуків системи на зміни умов експлуатації, даючи змогу системі швидко адаптуватися та підтримувати стабільність формації [10].

Ця секція розширює поняття адаптивного посилення в ковзних режимах керування, забезпечуючи підвищену адаптивність і стійкість системи під час роботи в непередбачуваних умовах. У цьому підході ковзний режим реалізується через контрольний закон:

$$u = -K \cdot \text{sign}(s), \quad (17)$$

де K – це не просто константа, а динамічно кориговане посилення, що адаптується до змін у параметрах системи та зовнішніх збуреннях. Адаптація K відбувається за допомогою алгоритму, що оцінює поточний стан динаміки системи й на основі цього аналізу коригує величину K , оптимізуючи відгук системи на непередбачені варіації.

Формула для адаптації K може бути виражена як

$$\dot{K} = \gamma(|s| - s_d), \quad (18)$$

де γ – позитивний коефіцієнт налаштування; s_d – бажане значення слайдингової поверхні, що відповідає оптимальному стану стабільності.

3. Аналіз стабільності закритої системи управління

Аналізується стабільність закритої системи керування з використанням теорії Ляпунова. Це дає змогу не тільки перевірити ефективність управління, але й забезпечити докази її надійності в різних робочих умовах.

Аналіз стабільності системи керування оснований на використанні функції Ляпунова, що є стандартним інструментом для перевірки стабільності динамічних систем. Функція Ляпунова для системи ковзного режиму керування зазвичай подана як квадратична форма [11, 12]:

$$V = s^T P s, \quad (19)$$

де P – позитивно визначена матриця, що встановлює "енергетичний ландшафт" системи. Ця функція обирається таким чином, щоб V збільшувалася за умови віддалення від стабільного стану системи.

Похідна функції Ляпунова:

$$\dot{V} = s^T (A_s^T P + P A_s) s + 2s^T P B_s u, \quad (20)$$

де A_s, B_s визначають динаміку системи та вплив контрольних сигналів відповідно. Тут $A_s^T P + P A_s$ має бути негативно визначеною. Це забезпечує, що \dot{V} стає негативною за умови відповідно підібраних контрольних зусиль u .

Адаптивне налаштування K використовується для коригування контрольного сигналу u на основі поточної динаміки стану системи. Коригування K може відбуватися за таким правилом:

$$\dot{K} = \gamma|s|, \quad (21)$$

де γ – позитивний коефіцієнт налаштування, що визначає швидкість реакції адаптації посилення. Це адаптивне посилення дає змогу системі більш ефективно реагувати на непередбачені збурення та невизначеності.

Крім того, для забезпечення надійності аналізу стабільності можуть упроваджуватися техніки зниження розмірності задачі, наприклад, за агрегування змінних або розгляд спрощених моделей для складних систем.

Це допомагає зрозуміти основні принципи стабільності, не заглиблюючись у переважно складну динаміку кожного елемента системи.

Такий підхід не тільки забезпечує математичну точність у визначенні стабільності системи, але й сприяє практичній здатності системи до адаптації та виживання в реальному світі, де змінні умови та невизначеності є нормою.

Результати досліджень та обговорення

У межах досліджень реалізовано інтеграцію методів керування з похідним і інтегральним кінцевим ковзним режимом та нелінійним спостерігачем збурень. Цей підхід спеціально адаптований для зменшення невизначеностей у системах формації "лідер – послідовник". Результати показали, що метод керування з похідним та інтегральним кінцевим ковзним режимом забезпечує високу точність і стабільність управління, а нелінійний спостерігач збурень ефективно компенсує невизначеності, підвищуючи стійкість системи до зовнішніх впливів [13].

Основною метою дослідження було розроблення та оцінювання ефективності керування роїв роботів із використанням методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень. Гіпотеза полягала в тому, що запропоновані методи зможуть значно підвищити точність і надійність управління роями роботів у складних умовах.

Для моделювання застосовувалася інформаційна система *CoppeliaSimEDU*. На сцені було розміщено три роботи моделі *dr20*: один лідер (*leader*) та два послідовники (*follower1*, *follower2*). Вони були обладнані ультразвуковими датчиками для визначення відстані до інших роботів та навколишніх об'єктів. Кожен робот був налаштований із використанням *Lua*-скриптів для реалізації алгоритмів керування.

У скриптах реалізовано два основних алгоритми керування: метод похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму для лідера та нелінійний спостерігач збурень для послідовників. Ці алгоритми забезпечували точний рух послідовників за лідером, підтримуючи задану дистанцію та уникаючи зіткнень.

Одним із найбільш поширених підходів до формування управління є метод "лідер – послідовник", за умови якого послідовник визначає своє положення тільки щодо лідера (рис. 3). Ми припустили, що взаємодія між агентами має відбуватися на "глобальному" рівні замість того, щоб підлеглий реагував лише на інформацію локального рівня. Локальна інформація може бути отримана з параметрів контролера, тоді як глобальні показники стосуються положення об'єкта загалом щодо довкілля. Ці дві категорії джерел інформації не є взаємовиключними. У моделі використовувалася проста модель узгодження швидкості. Отже, це дослідження додатково вивчає гіпотезу про те, що зчеплення "прямування за лідером" може регулюватися лише глобальною інформацією без залучення локальних відомостей.

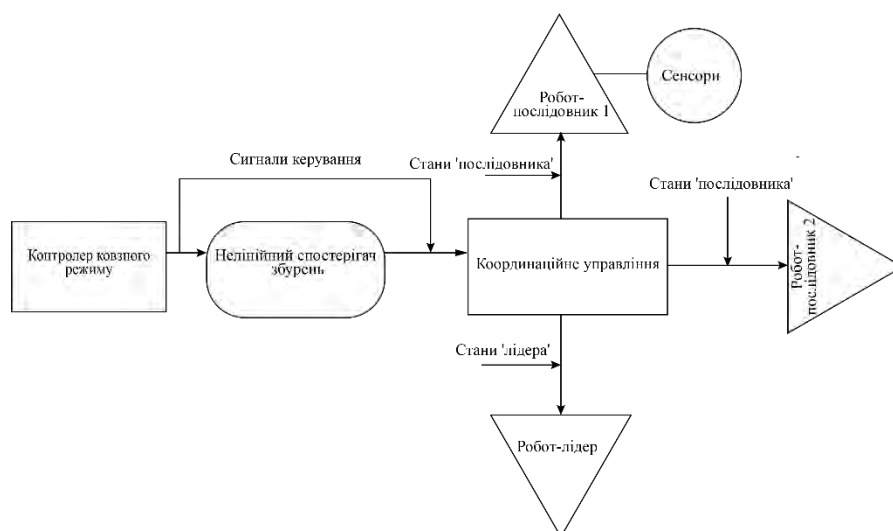


Рис. 3. Схема методу управління "лідер – послідовник"

У межах роботи запропоновано імітаційну модель, що координує рій відповідно до параметрів

контролерів "лідера" та "послідовника" з огляду на збереження дистанції між роботами *dr20*.

За допомогою інформаційної системи *CoppeliaSimEDU* побудовано програму, що відтворює сцену й модель поведінки трьох роботів, де один підпорядковується іншому – лідеру рою. Ініціатором візуалізації руху є користувач. Програма написана мовою сценаріїв *Lua*, яка є розширеною мовою програмування та призначена для підтримки загального процедурного програмування (рис. 4).

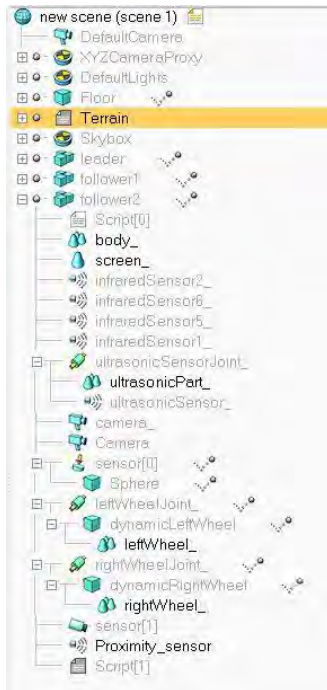


Рис. 4. Структура моделі візуалізації руху

Для керування рою реалізовано два основні алгоритми: метод похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму для лідера й нелінійний спостерігач збурень (NDOB) для послідовників. Ці алгоритми забезпечували точне прямування послідовників за лідером, підтримуючи задану дистанцію та уникаючи зіткнень.

Лідер був запрограмований на виконання певної траєкторії руху. Для цього застосовувалася функція *sim.setJointTargetVelocity*, яка задавала необхідну швидкість обертання коліс. Лідер рухався вперед, використовуючи просту модель узгодження швидкості.

Послідовники застосовували похідний та інтегральний кінцевий ковзний режим і нелінійний спостерігач збурень для точного слідування за лідером. Основна ідея полягала в тому, щоб використовувати показники з ультразвукових датчиків для визначення відстані до лідера та відповідним чином коригувати свою швидкість і напрямок руху.

На рис. 5 зображено розташування роботів на початковій стадії моделювання.

На рис. 6 показано, як роботи рухаються в рою за моделлю "лідер – послідовник". Під час експериментів виявлено, що запропоновані методи керування дають змогу досягти високої точності слідування та уникнення зіткнень навіть у складних умовах.

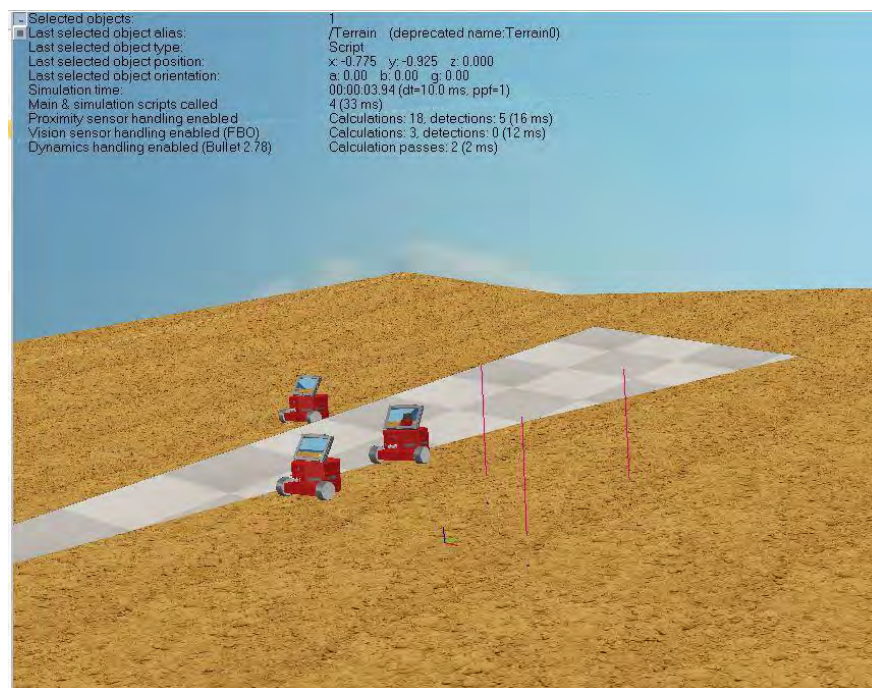


Рис. 5. Початкове розташування роботів *dr20* на сцені в *CoppeliaSim*

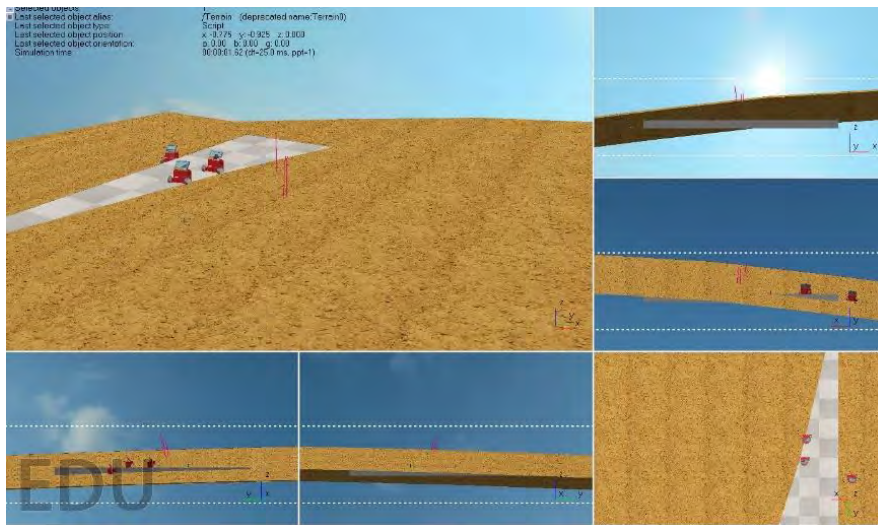


Рис. 6. Модель візуалізації руху роботів *dr20* за моделлю "лідер – послідовник"

Для подальшого аналізу проведено декілька експериментів, результати яких підтвердили ефективність похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень порівняно з традиційними методами керування.

Результати показали, що використання похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму й нелінійного спостерігача збурень забезпечує стабільність і точність управління роєм. Це допомагає зменшити час реакції системи на зовнішні збурення та підвищити стійкість управлінських процесів. Під час експериментів встановлено, що послідовники успішно прямували за лідером, підтримуючи необхідну дистанцію, навіть у разі зміни траєкторії лідера.

Висновки

У межах цього дослідження проведено комплексне моделювання та аналіз методів керування багатороботними системами типу "лідер – послідовник" з використанням похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму та нелінійного спостерігача збурень. Підтверджено ефективність запропонованих методів у забезпеченні високої точності та стабільності управління роєм роботів у складних умовах.

Перелічимо результати дослідження.

1. Точність слідування. Використання методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму дало змогу досягти високої точності руху послідовників за лідером. Це забезпечило підтримання необхідної дистанції між роботами та уникнення зіткнень.

2. Стабільність системи. Нелінійний спостерігач збурень ефективно компенсував невизначеності, що підвищило стійкість системи до зовнішніх впливів та забезпечило стабільність управлінських процесів.

3. Зменшення часу реакції. Інтеграція методів похідного та інтегрального кінцевого ковзного режиму з нелінійним спостерігачем збурень сприяла зменшенню часу реакції системи на зовнішні збурення, що є критичним для ефективного управління багатороботними системами в реальних умовах.

4. Ефективність у складних умовах. Експериментальні та симуляційні дослідження показали, що запропоновані методи керування забезпечують високу адаптивність і ефективність, навіть у складних умовах з динамічними змінами та непередбачуваними збуреннями.

Досягнуті результати відкривають нові перспективи для оптимізації керування багатороботними системами, забезпечуючи високу точність і надійність управління. Це дослідження може стати основою для подальших розробок у сфері робототехніки, автоматизації складних технологічних процесів та інтелектуальних транспортних систем.

Запропоновані методи можуть бути рекомендовані для широкомасштабного застосування в промисловості, де необхідна висока точність і надійність управління. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію цих методів для різних типів роботів та умов експлуатації, а також на інтеграцію з іншими передовими технологіями штучного інтелекту.

Список літератури

1. Qian D., Xi, Y. Leader–follower Formation Maneuvers for Multi-Robot Systems via Derivative and Integral Terminal Sliding Mode. *Applied Sciences*, 8 (7), 2018. 1045 p. DOI: 10.3390/app8071045
2. Qian D., Zhang G., Chen J., Wang J., Wu Z. Coordinated Formation Design of Multi-Robot Systems via an Adaptive-Gain Super-Twisting Sliding Mode Method. *Applied Sciences*, 9 (3), 2019. 484 p. DOI: 10.3390/app9030484
3. Nasir M., Maiti A. Adaptive Sliding Mode Resilient Control of Multi-Robot Systems with a Leader–Follower Model under Byzantine Attacks in the Context of the Industrial Internet. *Machines*, 12(1), 2024. 32 p. DOI: 10.3390/machines12010032
4. Rashid M.Z.A., et al. Comprehensive Review on Controller for Leader-Follower Robotic System. *Journal Name*, 11(2), 2019. P. 245–256. DOI: 10.1000/journalname.2019.11245
5. Qian D., Tong S., Guo J., Lee S.G. Leader-follower-based Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Mismatched Uncertainties via Integral Sliding Mode. *Journal of Systems and Control Engineering*, 229(7), 2015. P. 639–650. DOI: 10.1177/0959651815597843
6. Guo B., Liu J., Liu S., Wang J., Li M. CrowdDim: Crowd-inspired intelligent manufacturing space design. *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (6), 2022. P. 4856–4865. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3149456
7. Pham D.A., Han S.H. Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 2023. 1262 p. DOI: 10.3390/jmse11071262
8. Li C.D., Yi J.Q., Wang H.K., Zhang G.Q., Li J.Q. Interval data driven construction of shadowed sets with application to linguistic word modeling. *Information Sciences*, 507, 2020. P. 503–521. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.069
9. Shtessel Y., Taleb M., Plestan F. A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*, 48, 2012. P. 759–769. DOI: 10.1016/j.automatica.2012.02.030
10. Zhu J., Khayati K. A new approach for adaptive sliding mode control: Integral/exponential gain law. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 28(5), 2016. P. 1234–1245. DOI: 10.1177/0142331215583328
11. Romig S., Jaulin L., Rauh A. Using interval analysis to compute the invariant set of a nonlinear closed-loop control system. *Algorithms*, 12(12), 2019. 262 p. DOI: 10.3390/algorithms12120262
12. Yuan S., Lv M., Baldi S., Zhang L. Lyapunov-equation-based stability analysis for switched linear systems and its application to switched adaptive control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. DOI: 10.1109/TAC.2020.2979623
13. Lazim I. Mat, Husain A.R., Mohamed Z., et al. Effective formation tracking of quadrotors with intelligent disturbance observer-based control. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. 2021. DOI: 10.1007/s40998-021-00417-w
14. Liu X., Yu H. Continuous adaptive integral-type sliding mode control based on disturbance observer for PMSM drives. *Nonlinear Dynamics*. 2021. DOI: 10.1007/s11071-021-06360-z
15. Liu X., Yu H., Yu J., Zhao L. Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive. *IEEE Access*. 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2875142

References

1. Qian, D., Xi, Y. (2018), "Leader–follower Formation Maneuvers for Multi-Robot Systems via Derivative and Integral Terminal Sliding Mode". *Applied Sciences*, 8(7), 1045 p. DOI: 10.3390/app8071045
2. Qian, D., Zhang, G., Chen, J., Wang, J., Wu, Z. (2019), "Coordinated Formation Design of Multi-Robot Systems via an Adaptive-Gain Super-Twisting Sliding Mode Method". *Applied Sciences*, 9(3), 484 p. DOI: 10.3390/app9030484
3. Nasir, M., Maiti, A. (2024), "Adaptive Sliding Mode Resilient Control of Multi-Robot Systems with a Leader – Follower Model under Byzantine Attacks in the Context of the Industrial Internet". *Machines*, 12(1), 32 p. DOI: 10.3390/machines12010032
4. Rashid, M.Z.A., et al. (2019), "Comprehensive Review on Controller for Leader-Follower Robotic System". *Journal Name*, 11(2), P. 245–256. DOI: 10.1000/journalname.2019.11245
5. Qian, D., Tong, S., Guo, J., Lee, S.G. (2015), "Leader-follower-based Formation Control of Nonholonomic Mobile Robots with Mismatched Uncertainties via Integral Sliding Mode". *Journal of Systems and Control Engineering*, 229(7), P. 639–650. DOI: 10.1177/0959651815597843
6. Guo, B., Liu, J., Liu, S., Wang, J., Li, M. (2022), "CrowdDim: Crowd-inspired intelligent manufacturing space design". *IEEE Internet of Things Journal*, 9(6), P. 4856–4865. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3149456
7. Pham, D.A., Han, S.H. (2023), "Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System". *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1262 p. DOI: 10.3390/jmse11071262
8. Li, C.D., Yi, J.Q., Wang, H.K., Zhang, G.Q., Li, J.Q. (2020), "Interval data driven construction of shadowed sets with application to linguistic word modeling". *Information Sciences*, 507, P. 503–521. DOI: 10.1016/j.ins.2019.08.069
9. Shtessel, Y., Taleb, M., Plestan, F. (2012), "A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application". *Automatica*, 48, P. 759–769. DOI: 10.1016/j.automatica.2012.02.030
10. Zhu, J., Khayati, K. (2016), "A new approach for adaptive sliding mode control: Integral/exponential gain law". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 28(5), P. 1234–1245. DOI: 10.1177/0142331215583328

11. Romig, S., Jaulin, L., Rauh, A. (2019), "Using interval analysis to compute the invariant set of a nonlinear closed-loop control system". *Algorithms*, 12(12), 262 p. DOI: 10.3390/algorithms12120262
12. Yuan, S., Lv, M., Baldi, S., Zhang, L. (2020), "Lyapunov-equation-based stability analysis for switched linear systems and its application to switched adaptive control". *IEEE Transactions on Automatic Control*. DOI: 10.1109/TAC.2020.2979623
13. Lazim, I. Mat, Husain, A.R., Mohamed, Z., et al. (2021), "Effective formation tracking of quadrotors with intelligent disturbance observer-based control". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*. DOI: 10.1007/s40998-021-00417-w
14. Liu, X., Yu, H. (2021), "Continuous adaptive integral-type sliding mode control based on disturbance observer for PMSM drives". *Nonlinear Dynamics*. DOI: 10.1007/s11071-021-06360-z
15. Liu, X., Yu, H., Yu, J., Zhao, L. (2018), "Combined speed and current terminal sliding mode control with nonlinear disturbance observer for PMSM drive". *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2875142

Надійшла (Received) 21.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Калашнікова Василиса Ігорівна – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірантка кафедри "Інформаційних технологій проектування", Харків, Україна; e-mail: v.kakashnikova@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1541-9635>

Kalashnikova Vasylysa – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M.E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Information Technology Design, Kharkiv, Ukraine.

APPLICATION OF DERIVATIVE AND INTEGRAL TERMINAL SLIDING MODES IN LEADER-FOLLOWER TYPE SYSTEMS

Subject matter: The study focuses on the control methods for dr20 type robot swarms, specifically on the derivative and integral terminal sliding mode control combined with a nonlinear disturbance observer. The problem of effective swarm control is highly relevant in the current conditions of automation and robotics, especially in the context of performing complex tasks in limited space and in the presence of disturbances. **Goal:** The development and analysis of a simulation model for the movement of a robot swarm using advanced control methods to ensure system accuracy and stability. The research aims to improve the control methods for robot swarms, enhancing their efficiency and reliability in various operational conditions. **Tasks:** 1) Develop a simulation model of a robot swarm in the CoppeliaSimEDU environment, considering all necessary parameters for modeling real operating conditions. 2) Implement control algorithms for the leader and followers to maintain the swarm structure and avoid collisions. 3) Conduct a series of experiments to test the effectiveness of the proposed methods, analyzing the results in terms of stability and control accuracy. **Methods:** Modeling in CoppeliaSimEDU, implementing control algorithms based on derivative and integral terminal sliding mode control, applying a nonlinear disturbance observer to improve system stability. The applied methods allow for the consideration of various disturbances and ensure high control accuracy. **Results:** The proposed control model allows achieving high following accuracy and collision avoidance even in complex conditions. Experiments have shown that the control methods ensure the stability and accuracy of the robot swarm's movement, reducing the response time to external disturbances. The research results demonstrate that the use of derivative and integral terminal sliding mode control combined with a nonlinear disturbance observer significantly enhances the efficiency of multi-robot systems. **Conclusions:** The use of advanced control methods significantly improves the efficiency of multi-robot systems, ensuring their reliability and accuracy in real operating conditions. The proposed methods can be applied in various fields where the coordination of a large number of robots is required, including logistics, rescue operations, and environmental monitoring.

Keywords: robotics; control systems; reliability; stability; automation; sliding mode; disturbance observer; multi-robot systems.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Калашнікова В. І. Застосування похідних та інтегральних кінцевих режимів у системах типу "лідер – послідовник". *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.005>

Kalashnikova, V. (2024), "Application of derivative and integral terminal sliding modes in leader-follower type systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.005>

М. Кікоть, Ю. Малєєва

МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РЕСАЙКЛІНГУ СКЛАДНОЇ ТЕХНІКИ

Предмет дослідження – моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. **Метою роботи** є створення оптимізаційних моделей, які зважатимуть на основні фактори під час формування інфраструктури ресайклінгу й поєднують централізовані та децентралізовані елементи для підвищення ефективності цього процесу. **Завдання:** проаналізувати сучасні підходи до організації ресайклінгу складної техніки; визначити критерії та фактори для оптимізації інфраструктури ресайклінгу; розробити багаторівневу інфраструктуру ресайклінгу; сформувати моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємств і логістичні витрати, екологічний вплив та інші фактори. **Методи:** системний підхід, структурне моделювання, моделі оптимізації. **Результати:** проаналізовано підходи до організації інфраструктури ресайклінгу: централізований, розподілений та комбінований; обґрунтовано вибір комбінованого підходу для створення логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки; розроблено структурну багаторівневу модель інфраструктури ресайклінгу з нижнім рівнем (сортувальні підприємства), середнім рівнем (підприємства з перероблення) та верхнім рівнем (організаційне управління); сформовано математичні моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище. **Висновки.** Запропонована структурна багаторівнева модель інфраструктури ресайклінгу складної техніки поєднує переваги централізованого та децентралізованого управління, забезпечуючи гнучкість, надійність системи до зовнішнього впливу, мінімізацію витрат і стійкий контроль процесів. Використання розроблених моделей оптимізації дає змогу брати до уваги виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище та інші фактори для пошуку найбільш ефективної конфігурації інфраструктури ресайклінгу. Реалізація запропонованої інфраструктури ресайклінгу забезпечить формування злагодженої взаємодії між державними органами, підприємствами, громадськими організаціями та міжнародними партнерами.

Ключові слова: ресайклінг складної техніки; комбінована інфраструктура; логістика; екологічний вплив; виробничі потужності.

Вступ

Сучасний світ стоїть перед викликами, пов'язаними з екологічною кризою, яка загрожує найціннішим ресурсам планети та загальному добробуту суспільства. Одним із найбільш актуальних сучасних завдань є ефективне управління відходами та розроблення сталих моделей споживання, а також безвідходного виробництва. У цьому контексті ресайклінг виходить на передовий план як ключовий елемент безпечного розвитку індустрії.

Ресайклінг – це багаторазове використання ресурсів завдяки повному переробленню відходів від стану сировини до стану готового продукту. У загальноприйнятому розумінні цей процес належить насамперед до перероблення виробів із паперу, пластику, скла, металу тощо. У широкому ж значенні термін "ресайклінг" – це процес отримання сировини внаслідок повторного перероблення відходів [1].

Ресайклінг у європейських країнах є важливою частиною екологічної політики, спрямованої на

сприяння круговій економіці та зменшення кількості відходів.

Уся система ресайклінгу складної техніки (СТ) охоплює різні типи перероблюваних матеріалів, таких як метал, пластик, акумулятори, скло, електронні плати тощо. Кожен із перелічених матеріалів має свої особливості перероблення, тому їх необхідно спрямовувати до відповідних пунктів, оснащених обладнанням для перероблення конкретних матеріалів. Відповідно, система ресайклінгу передбачає наявність мережі взаємопов'язаних підприємств, що спеціалізуються на різних процесах перероблення та формують певну інфраструктуру.

Іспанська королівська академія (*Real Academia Española, RAE*, 2022) визначає інфраструктуру як "сукупність елементів, засобів або послуг, необхідних для належного функціонування країни, міста чи будь-якої форми організації" [2]. Американський словник спадщини (2022) визначає її як "об'єкти" і як "базову основу, або фундамент, особливо для організації чи системи" [3].

Отже, під інфраструктурою ресайклінгу розуміємо комплексну систему, що містить підприємства з перероблення різних видів відходів, логістичні центри, транспортні шляхи, а також зв'язки та взаємодію між цими компонентами системи. **Об'єктом дослідження** в статті є інфраструктура ресайклінгу складної техніки. **Предмет дослідження** – моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки.

Розвиток транспортної інфраструктури в процесі глобалізації відіграв важливу роль в об'єднанні різних країн у світову економіку. Витрати на транспортування відходів та їх утилізацію стали дуже важливими для всіх країн [4]. Тому побудова інфраструктури ресайклінгу таким чином, щоб оптимізувати дистанцію між пунктами перероблення, їх кількість, види обладнання та процес взаємодії між ними, є актуальним завданням.

Інфраструктура ресайклінгу має бути побудована з огляду на важливий і невід'ємний фактор – екологічну безпеку. Необхідно мінімізувати вплив небезпечних компонентів СТ на навколишнє середовище та людей. За умови невідповідного поводження та утилізації на незакрытих звалищах сполуки, які містяться в складі компонентів СТ, забруднюють ґрунтові води та становлять значний ризик для довкілля та здоров'я людей [5]. Дотримання принципів безпечності допоможе не лише захистити персонал під час перероблення, але й сприятиме ефективному та екологічно відповідальному переробленню матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні у світовій науковій спільноті тема ресайклінгу СТ набула значного розвитку. Процес перероблення СТ часто супроводжується труднощами через недостатню дослідженість деяких аспектів і потребує залучення фахівців. Незважаючи на складність завдання, перероблення такої техніки є важливим для збереження природних ресурсів і захисту довкілля, тому воно відіграє ключову роль у забезпеченні стійкого розвитку та зменшенні негативного впливу на екосистеми [6].

Покращення управління ресайклінгом у країнах з перехідною економікою, зокрема внаслідок упровадження зелених логістичних схем, може призвести до збільшення кількості вторинної сировини на 20% до 2030 р. в таких містах, як Добой, а також оптимізувати транспортні маршрути для ефективнішого збору та перероблення [7].

Виклики та можливості у сфері поводження з пластиковими відходами в Європі пов'язані з місцем сучасного перероблення в збільшенні кількості та типів відходів, що можуть бути перероблені. Важливість розбудови раціональної інфраструктури та систем сортування є ключовим фактором для забезпечення стабільного постачання сировини, необхідного для ефективної роботи передових технологій перероблення. Успішні пілотні програми з удосконалення оптичного сортування та альтернативні методи збору сприяють підвищенню рівня перероблення [8].

Іноземний досвід має сучасний погляд на проблеми та ефективні рішення у сфері ресайклінгу СТ у нашій країні, що може бути основою для подальших досліджень і впровадження інноваційних підходів.

В Україні вивченню проблем ресайклінгу також приділено значну увагу в наукових студіях. Зокрема, українські науковці розглядали правові, технічні, економічні та соціальні аспекти ефективного управління твердими побутовими відходами в контексті особливостей економіки країни.

Ефективне управління твердими побутовими відходами в Україні потребує комплексного підходу, що охоплює як правові, технічні, економічні, так і соціальні аспекти. Водночас логістичному напрямку й вітчизняному ресайклінгу СТ приділяється недостатньо уваги [9, 10].

Проблематика теми інтенсивності процесів ресайклінгу відтворює питання логістики в країні, без вирішення яких неможливо забезпечити ефективність національної системи поводження з відходами [11, 12].

Мережі замкнутої логістики та створення математичних моделей для оптимізації маршрутів перевезень відіграють ключову роль для ефективності логістичних систем, зокрема структурно-топологічні трирівневі централізовані мережі для глобальних перевезень та кільцеві маршрути для локальних перевезень [13].

Основні параметри якості логістичного обслуговування споживачів, такі як час оброблення замовлень, гарантована доставка за будь-яких умов, об'єктивність цін на логістичні послуги, є важливими критеріями для порівняння наявних інфраструктурних об'єктів та оптимізації логістичної системи ресайклінгу в Україні [14].

Особливу увагу необхідно приділити утилізації та повторному використанню компонентів авіаційних транспортних засобів. Адже утилізація великих

літаків, наприклад *Boeing-747*, може приносити значні доходи завдяки повторному використанню деталей та матеріалів, і цей процес стає важливим елементом оптимізації використання ресурсів у авіаційній галузі, оскільки вигідніше продавати літак на запчастини, ніж цілим. Тому перед авіабудівниками стоїть завдання оптимізувати кругообіг матеріалів, перетворивши сферу виробництва й використання повітряного флоту в замкнутий цикл [15].

Дослідники в галузі ресайклінгу, особливо таких складних технологій, як перероблення літій-іонних батарей (ЛІБ), активно вивчають кілька ключових питань. Поточні дослідження часто стосуються методів прямого перероблення ЛІБ, що пропонують екологічні переваги, наприклад зменшення споживання енергії та викидів у процесі утилізації, порівняно з більш традиційними методами, що впроваджуються в пірометалургії або гідрометалургії. Однак, незважаючи на досягнуті успіхи, критично важливою проблемою є створення та масштабування нових технологій перероблення від лабораторного до промислового рівня. Багато новітніх методів ще не пройшли випробування в масштабах, які б підтвердили їх комерційну життєздатність і сталість [16].

Отже, ефективне й повноцінне моделювання процесів ресайклінгу неможливе без розв'язання завдань логістики.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми

У процесі планування і розроблення системи ресайклінгу СТ насамперед необхідно проаналізувати найбільш поширені види перероблюваної сировини щодо перспектив і можливостей їх перероблення та повторного використання, вартості та шкідливості для навколишнього середовища тощо. Це допоможе надалі провести узагальнений аналіз підприємств, які можуть або спеціалізуватися на переробленні окремих видів компонентів СТ, або на комплексному переробленні техніки загалом, зважаючи на екологічні стандарти та можливості адаптації до місцевих умов, і, отже, описати основні елементи системи ресайклінгу СТ і зв'язки між ними. Обов'язковим завданням є також увага до витрат фінансів та часу на проект. Згідно з роботою [6] ресурси, що вивільняються внаслідок ресайклінгу, можуть бути додатковим джерелом отримання доходу, тому, відповідно до принципів ресурсозбереження, необхідно приділяти

особливу увагу завершальній стадії життєвого циклу СТ – утилізації. Крім того, процес ресайклінгу має відповідати нормам і критеріям щодо негативного впливу процесів перероблення на довкілля та безпосередньо робітників.

Отже, наразі не існує системної комплексної моделі інфраструктури ресайклінгу СТ, недостатньо уваги приділено питанням оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище.

Зважаючи на вказані недоліки попередніх студій, у роботі необхідно дослідити форми організації процесів ресайклінгу СТ з виявленням їх обмежень та переваг і обґрунтуванням вибору раціонального підходу.

Беручи до уваги різноманітність компонентів і матеріалів у складі СТ, інфраструктура ресайклінгу має відповідати конкретним вимогам. Має бути передбачена координація між підприємствами з перероблення та сортування і наявність керівного органу, що забезпечить оптимізацію процесу ресайклінгу й дасть змогу мінімізувати витрати на транспортування, підвищити ефективність та безпечність процесів ресайклінгу СТ.

Визначення основних критеріїв, що характеризують процес ресайклінгу СТ, допоможе розробити таку систему, що допоможе брати до уваги й відтворювати зв'язки між різними підприємствами, їх технологічні особливості та обмеження з огляду на норми й екологічні стандарти.

Мета й завдання роботи

Отже, автори публікації ставлять за мету створити оптимізаційні моделі, які зважають на основні фактори під час формування інфраструктури ресайклінгу й поєднують централізовані та децентралізовані елементи для підвищення ефективності цього процесу. Для здійснення окресленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до організації ресайклінгу складної техніки;
- визначити критерії та фактори для оптимізації інфраструктури ресайклінгу;
- розробити багаторівневу інфраструктуру ресайклінгу;
- сформуванню моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності

підприємств та логістичні витрати, екологічний вплив та інші фактори.

Основна частина

Проаналізуємо підходи до організації логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ.

1. *Централізований підхід.* Характеризується здійсненням процесів ресайклінгу із використанням виробничих потужностей великого підприємства, яке здатне обробити значний об'єм відходів.

2. *Децентралізований підхід.* Має перевагу в гнучкості та стійкості всієї системи завдяки значній кількості дрібних підприємств, що зі свого боку сприяє розвитку місцевих економік і створенню робочих місць, але потребує організації логістичних зв'язків між окремими підприємствами.

3. *Комбінований підхід.* Два попередні підходи формують підхід, що має переваги у поєднанні потужностей великого підприємства з дрібними. Комбінована структура є гнучкою, інтегрованою системою перероблення, яка адаптується до різноманітних типів відходів і локальних умов, поєднуючи великі переробні заводи з мережею маленьких локальних пунктів перероблення. Комбінований підхід дає змогу оптимізувати процеси збору, сортування, транспортування та перероблення відходів, знижуючи витрати та підвищуючи ефективність ресайклінгу.

Отже, перероблення СТ в Україні потребує створення нового підходу, що передбачає розроблення комбінованої інфраструктури, яка поєднує централізовані та розподілені елементи.

У процесі розроблення такої інфраструктури ресайклінгу СТ важливо визначити особливості видів відходів, їх властивості та потенціал для перероблення. Аналіз різних компонентів і матеріалів, що застосовуються в сучасних промислових та побутових виробках, демонструє значну різницю у можливостях їх повторного використання, вартості та складності перероблення, впливу на довкілля. У табл. 1 наведено види матеріалів, їх властивості та особливості перероблення, що дасть змогу структурувати інформацію для ефективного прийняття управлінських рішень у різних ланках логістичного ланцюга.

Унаслідок аналізу літератури [17–19] були виокремлені певні характеристики. Розглянемо їх більш детально.

Можливості перероблення. Від переплавлення металів до вилучення цінних металів із мікросхем та електронних плат можливості перероблення

значно різняться. Метали, зокрема сталь і алюміній, є одними з найпоширеніших для перероблення завдяки їх високій вартості та низькому фактору небезпеки під час перероблення. Натомість складніші компоненти, такі як акумулятори та елементи, що містять рідкісноземельні метали, вимагають більш складних процесів перероблення через наявність токсичних речовин. Перероблення мікросхем також є складним процесом, оскільки вони містять цінні метали, такі як золото, що необхідно вилучати та відновлювати.

Можливість повторного використання. Деякі матеріали, зокрема метал і скло, мають високу можливість повторного використання, тоді як інші, наприклад пластик і рідини, мають обмежені властивості через деградацію матеріалів або необхідність спеціальної утилізації.

Вартість і цінність перероблення. Вартість перероблення матеріалів також варіюється. Метали, зокрема дорогоцінні, мають високу цінність у переробленні, тоді як вартість перероблення пластику та гумових елементів може бути нижчою через їх меншу цінність.

Фактор безпеки під час перероблення. Безпека в процесі перероблення є критично важливим аспектом. Метали та скло мають низький фактор небезпеки, тоді як перероблення мікросхем, акумуляторів та рідин може бути дуже небезпечним через наявність токсичних речовин, що потребують спеціальних умов перероблення.

Вплив на довкілля під час зберігання. Неперероблені матеріали значно забруднюють довкілля: метал корозіює; мастила забруднюють ґрунт і воду; пластик і поліетилен спричиняє тривале забруднення та утворення мікропластику, що вважається серйозною екологічною проблемою; гумові елементи довго розкладаються та разом з мікросхемами й електронними платами, акумуляторами, LCD-дисплеями забруднюють токсичними речовинами.

Складність перероблення. Процес перероблення матеріалів залежить від їх фізичних та хімічних властивостей. Метал і скло є відносно легкими для перероблення, тоді як мікросхеми, рідини, акумулятори та LCD-дисплеї вимагають більш складних технологій і спеціальних умов.

Наведені в табл. 1 відомості щодо особливостей перероблення окремих компонентів СТ демонструють, що для їх перероблення необхідне впровадження спеціалізованих технологій з огляду на економічні, екологічні та безпекові фактори. Відповідно,

доцільно це брати до уваги в побудові системи виконуватимуть функцію перероблення небезпечних ресайклінгу СТ і визначенні підприємств, що компонентів СТ раціональним чином.

Таблиця 1. Види та властивості матеріалів і компонентів складної техніки

Матеріали та компоненти	Можливості перероблення	Можливість повторного використання	Ціна та цінність перероблення	Фактор небезпеки під час перероблення	Вплив на довкілля в процесі зберігання	Складність перероблення
Метал	Переплавлення для виробництва нових металевих продуктів	Висока, особливо для сталі та алюмінію	Висока, особливо для дорогоцінних металів	Низький для більшості металів	Тривала корозія та забруднення ґрунту й води	Низька
Пластик	Перероблення в нові пластикові вироби або енергію	Обмежена через деградацію матеріалу	Залежить від типу пластику; зазвичай низька	Низький, за винятком ПВХ	Тривале забруднення довкілля	Середня
Скло	Переплавлення для виробництва нового скла або інших продуктів	Висока, особливо для безбарвного скла	Середня, залежить від якості скла	Низький	Нешкідливий, але займає багато місця на звалищах	Низька
Мікросхеми	Вилучення цінних металів	Обмежена, компоненти зношуються	Висока через наявність дорогоцінних металів	Високий через токсичні речовини	Високий рівень забруднення важкими металами та хімічними речовинами	Висока
Кабелі та провідники	Вилучення металів, зокрема міді та алюмінію	Висока, особливо для міді	Висока, особливо для міді	Низький	Забруднення ґрунту та води через витік хімічних речовин з ізоляційних матеріалів	Середня
Рідини та мастила	Часто потребують спеціальної утилізації, можливість вторинного використання як палива	Обмежена, залежно від складу	Залежить від складу; зазвичай низька	Високий через можливі токсичні компоненти	Забруднення водних ресурсів та ґрунтів токсичними речовинами	Висока
Гумові елементи	Перероблення для подальшого використання, наприклад, у складі дорожнього покриття	Обмежена через зношування матеріалу	Залежить від типу гуми; зазвичай середня	Низький, але може містити токсичні домішки	Тривале розкладання, виділення токсичних речовин	Середня
Оптичні компоненти	Перероблення оптичного скла або пластику в нові оптичні прилади	Обмежена, технологічно складно	Висока для якісних матеріалів	Низький до середнього, залежно від матеріалів	Забруднення довкілля складними матеріалами	Висока
Поліетилен	Перероблення в нові пластикові вироби, зокрема пакувальні матеріали	Використання у виготовленні сумок, контейнерів	Залежно від ринку; висока цінність у переробленні пакувальні матеріали	Низький ризик, простий процес	Тривале забруднення, можливе утворення мікропластику	Низька
Електронні плати	Вилучення цінних металів (золото, срібло, мідь)	Обмежене повторне використання через знос компонентів	Висока вартість через цінні метали	Високий ризик через токсичні речовини	Забруднення ґрунту й води	Висока
Акумулятори	Перероблення на нові акумулятори або вилучення хімічних компонентів	Вторинне використання після перезарядження	Висока, через складність та вартість перероблення матеріалів	Високий, потребує обережного поводження через токсичність	Забруднення ґрунту та води токсичними речовинами, зокрема свинцем і кислотами	Висока
LCD-дисплеї	Вилучення скла та інших матеріалів	Обмежена, через складність демонтажу без пошкодження	Середня цінність, залежить від якості матеріалів	Помірний, потребує обережності через наявність ртуті в деяких моделях	Забруднення важкими металами та ґрунто	Середня

Побудова ефективного механізму управління логістичною системою підприємств із перероблення переслідує мету оптимізувати та вдосконалити вже наявну логістичну систему. Це передбачає інтеграцію різних видів підприємств, що відрізняються своїми функціями, масштабом і ступенем централізації.

Інфраструктура ресайклінгу СТ має багаторівневу структуру, яка поєднує централізовані та децентралізовані елементи. Її можна умовно поділити на три основні рівні (рис. 1):

1) верхній рівень – регламентуючий орган, що відповідає за координацію процесів ресайклінгу та контроль за ними на загальнодержавному рівні;

2) середній рівень – підприємства з перероблення (ПП) відходів. Вони можуть бути вузькоспеціалізованими або широкого профілю, які переробляють різні види відходів;

3) нижній рівень – сортувальні підприємства (СП), що займаються первинним обробленням відходів: збором, сортуванням і підготовкою до подальшого перероблення.

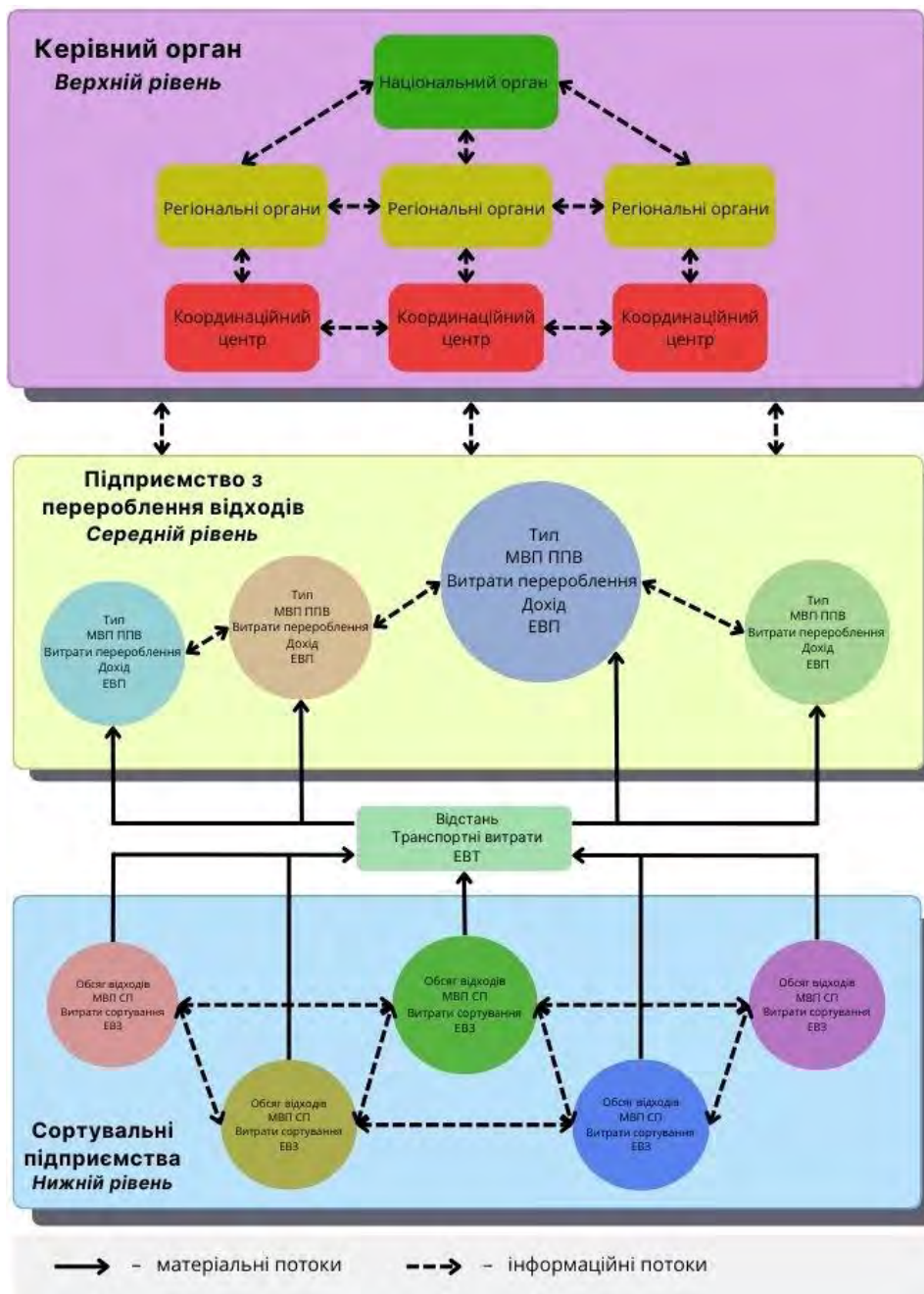


Рис. 1. Рівні ієрархії та параметри елементів інфраструктури ресайклінгу складної техніки

Розглянемо детально складники та параметри зазначених рівнів.

Верхній рівень. Інфраструктурі необхідно мати ефективний керівний апарат (КА) для планування та координації ресайклінгу СТ в Україні. Він має бути створений з ланцюга підструктур, що відповідають за свій сектор, а саме:

- 1) національний орган – відповідальний за розроблення національної стратегії управління відходами, координацію з регіональними агентствами та впровадження політик, пов'язаних із ресайклінгом;
- 2) регіональні органи – працюють безпосередньо в областях і керують впровадженням національної політики на місцевому рівні. Також слідкують за збором та переробленням складної техніки, взаємодіють із місцевими організаціями та підприємствами, стежать за дотриманням стандартів і ведуть облік;
- 3) координаційний центр – забезпечує взаємодію між різними учасниками ринку ресайклінгу: виробниками, переробними підприємствами та громадськістю.

Одними із ключових завдань КА є розроблення та впровадження сучасних ІТ-систем для ефективного моніторингу та управління процесами, а також інтеграція з міжнародними стандартами й практиками. Співпраця з європейськими організаціями відчиняє двері для міжнародного фінансування та партнерства.

Середній рівень. Після первинного оброблення та сортування відходи транспортуються на підприємства з перероблення, що відповідають середньому рівню структури. Для забезпечення ефективного збору та доставки відпрацьованих пристроїв від джерел їх утворення до центрів перероблення важливо визначити оптимальні маршрути й розклади транспортування. Цей логістичний процес передбачає увагу до відстаней, часу транспортування, об'єму вантажу, доступності та можливостей транспортних мереж.

Підприємства можуть бути як централізованими (великі заводи з широким спектром перероблення різноманітних відходів), так і вузькоспеціалізованими (наприклад, підприємства з перероблення батарейок або акумуляторів, чи промислових відходів з увагою на екологічно чистих методах перероблення).

Централізовані підприємства матимуть більші виробничі потужності та зможуть переробляти значні об'єми відходів різних видів. Водночас вузькоспеціалізовані підприємства будуть зосереджені на конкретних видах відходів, що дасть змогу їм досягти більшої ефективності та глибини перероблення. Усі вони мають бути оснащені відповідним технологічним обладнанням, таким як розбірні лінії,

печі для плавлення металів, установки для вилучення цінних компонентів, системи очищення та нейтралізації токсичних речовин тощо.

Компоненти системи ресайклінгу СТ на різних рівнях визначаються різними параметрами. Середній рівень системи ресайклінгу СТ можна характеризувати таким набором параметрів:

тип – тип підприємства з перероблення (централізоване, вузькоспеціалізоване);

МВП ППВ – максимальна виробнича потужність підприємства з перероблення відходів, тобто максимальний об'єм відходів, який воно може переробити за певний період (зазвичай за рік). Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

витрати перероблення – витрати на перероблення одиниці відходів на певному підприємстві. Передбачають витрати на персонал, енергію, обладнання, утилізацію відходів тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

дохід – дохід, який підприємство отримує від реалізації продуктів перероблення (вторинної сировини, матеріалів тощо) з одиниці перероблених відходів. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВП – екологічний вплив процесу перероблення на певному підприємстві, що має викиди, утворює небезпечні відходи, споживає чимало енергії тощо. Вимірюється у відповідних одиницях (наприклад, CO₂-екв/рік для викидів парникових газів).

Нижній рівень. На цьому рівні передбачається створення мережі сортувальних підприємств, які будуть розташовані в різних регіонах країни. Необхідно, щоб вони мали необхідні технічні та технологічні засоби, такі як демонтажне обладнання, сортувальні лінії, обладнання для попереднього перероблення, технології використання вторинної сировини, моніторингові та управлінські системи. Таке обладнання можуть мати як централізовані, так і децентралізовані підприємства залежно від конкретних умов і вимог. Крім того, ці підприємства можуть відігравати роль у впровадженні вдосконалених технологій сортування та розділення відходів для забезпечення ефективності подальшого їх перероблення.

Сортувальні підприємства можуть різнитися за своїми виробничими потужностями та спеціалізацією. Їх характеристики визначатимуться об'ємами утворення відходів у регіоні та логістичними можливостями.

Важливою умовою функціонування сортувальних підприємств є наявність відповідної інфраструктури для прийому відходів від населення та організацій. Це можуть бути як стаціонарні пункти прийому,

пересувні пункти збору, так і програми збору відходів безпосередньо від споживачів тощо.

Також важливо, щоб ця умова охоплювала виробників СТ. Вони мають бути оснащені контейнерами або спеціалізованою інфраструктурою для прийому відпрацьованих пристроїв від споживачів. Для залучення споживачів і покращення збору техніки доцільно запровадити програми стимулювання, такі як обмін відпрацьованої техніки з відповідною знижкою на нову, програми підтримки повторного продажу старої, але ще робочої техніки через інтернет-платформи або магазини, організація безкоштовного вивезення техніки з дому. Ця програма дає змогу споживачам ефективно утилізувати свою стару техніку, запобігаючи її потраплянню на сміттєзвалище та сприяючи вторинному використанню ресурсів. Компоненти системи ресайклінгу СТ на різних рівнях визначаються різними параметрами. Для нижнього рівня властиві такі параметри:

об'єм відходів – кількість відходів, що надходить на сортувальне підприємство від джерел утворення (населення, організацій тощо) у певному регіоні. Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

МВП СП – максимальна виробнича потужність сортувального підприємства, тобто граничний об'єм відходів, який воно може прийняти та відсортувати за певний період часу. Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

витрати сортування – витрати на збір та сортування одиниці відходів на певному СП. Передбачають витрати на персонал, обладнання, транспортування, утилізацію відходів тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВЗ – екологічний вплив процесів збору відходів на певному підприємстві, пов'язаний із викидами від транспорту, утворенням відходів тощо. Вимірюється у відповідних одиницях.

Зв'язки. Між різними рівнями та елементами інфраструктури ресайклінгу існують логістичні зв'язки, що забезпечують взаємодію та обмін матеріальними та інформаційними потоками. Організація та координація руху вантажів, забезпечення їх відправлення і прийому мають бути вчасними й безперервними. Це передбачає складання та виконання графіків транспортування, управління складськими запасами, а також розв'язання будь-яких проблем або затримок, що виникають під час транспортування.

Сортувальні підприємства постачають відсортовані відходи на підприємства з перероблення. У цьому разі важливим фактором буде відстань між цими

підприємствами, що впливатиме на вартість транспортування. Тому в плануванні інфраструктури необхідно зважати на оптимальне розміщення сортувальних та переробних підприємств для мінімізації логістичних витрат.

Підприємства з перероблення постачають вторинну сировину й матеріали на ринок або на подальше перероблення. Важливим аспектом є налагодження ефективних каналів збуту для продукції ресайклінгу, що дасть змогу підвищити економічну ефективність усієї системи.

Зв'язки між середнім і нижнім рівнями системи ресайклінгу СТ визначаються насамперед таким набором параметрів:

відстань – відстань між СП і ПП, що впливає на витрати та екологічний вплив транспортування відходів. Одиниці виміру: кілометри;

транспортні витрати – витрати на транспортування одиниці відходів між СП і ПП. Залежать від відстані, виду транспорту, вартості палива тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВТ – екологічний вплив транспортування відходів між підприємствами – пов'язаний, зокрема, з викидами від транспортних засобів, споживанням палива тощо. Може вимірюватися, наприклад, у тоннах СО₂-екв/км.

Для оптимізації запропонованої інфраструктури ресайклінгу СТ може бути використана математична модель, що містить різні фактори, а саме: виробничі потужності підприємств, логістичні витрати, екологічний вплив тощо. Зазначені фактори можуть бути формалізовані як у цільовій функції, так і в обмеженнях. Отже, можна побудувати різні моделі оптимізації та обрати саме ту, що буде ефективною для виконання пріоритетних завдань комплексного перероблення СТ.

Для побудови оптимізаційних моделей, що мають покращити основні показники системи ресайклінгу СТ, такі як дохід, витрати та екологічний вплив, необхідно зважати на низку параметрів. З огляду на технологічні та економічні характеристики процесів перероблення відходів запропоновано математичні моделі з такими параметрами:

R – дохід від реалізації кінцевого продукту ресайклінгу;

V – об'єм відходів, які підлягають ресайклінгу;

C – витрати на ресайклінг відходів;

D – відстань між локальними пунктами збору та сортування і підприємствами з перероблення;

E – оцінка впливу процесів ресайклінгу на навколишнє середовище;

T – час, необхідний для проведення ресайклінгу.
Зважаючи на мережну структуру системи підприємств ресайклінгу, запропонуємо позначки, що дадуть змогу розглянути її складники:

i – порядковий номер виду відходу, $i = 1 \dots n$;

n – кількість видів відходів, що підлягають збору, сортуванню і переробленню;

j – порядковий номер локального пункту зі збору й сортування (ЛПЗС), $j = 1 \dots J$;

J – кількість локальних пунктів ЛПЗС;

k – порядковий номер підприємства з перероблення (ПП), $k = 1 \dots K$;

K – кількість підприємств з перероблення.

Подано інфраструктуру ресайклінгу СТ, запропоновану на рис. 1, у формалізованому вигляді (рис. 2). Позначки на рис. 2 відповідають описаним вище показникам.

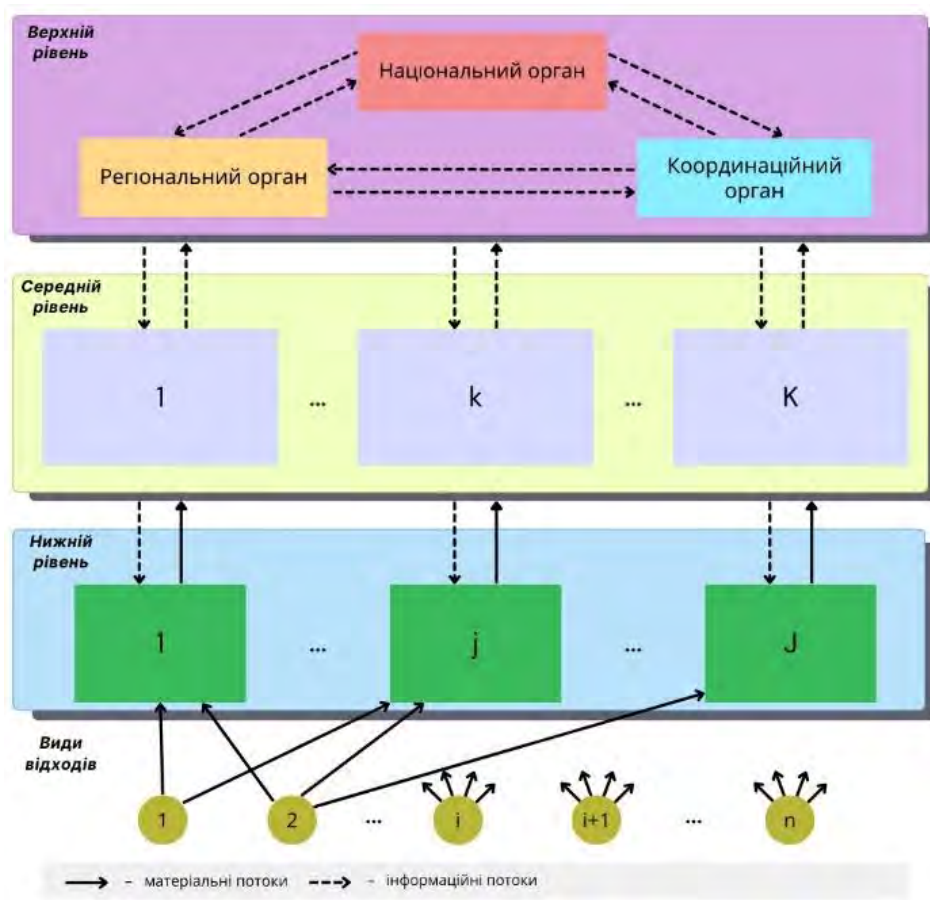


Рис. 2. Структурна модель інфраструктури ресайклінгу складної техніки

Відповідно, основні фактори в моделі ресайклінгу подамо таким чином:

r_k – дохід від продажу переробленої продукції на k -му ПП;

v_k – об'єм готової продукції, виробленої на k -му ПП;

v_{ij} – об'єм відходів i -го виду, що збирається та сортується в j -му ЛПЗС;

v_{ijk} – об'єм відходів i -го виду, що транспортується з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

v_{ik} – об'єм відходів i -го виду, що переробляється на k -му ПП;

d_{jk} – відстань від j -го ЛПЗС до k -го ПП;

c_{ij} – витрати на збір і сортування одиниці об'єму відходів i -го виду в j -му ЛПЗС;

c_{ijk} – витрати на транспортування одиниці об'єму i -го виду відходів з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

c_{ik} – витрати на перероблення одиниці об'єму відходів i -го виду на k -му ПП;

e_{ij} – ЕВЗ, екологічний вплив під час збору та сортування одиниці об'єму відходів i -го виду в j -му ЛПЗС;

e_{ijk} – ЕВТ, екологічний вплив під час транспортування відходів одиниці об'єму i -го виду з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

e_{ik} – ЕВП, екологічний вплив під час перероблення одиниці об'єму відходів i -го виду на k -му ПП.

Сформуємо локальні цільові функції для можливих задач оптимізації ресайклінгу СТ у вигляді, поданому нижче.

1. Мінімізація витрат на збір відходів у локальних пунктах:

$$C_{col} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n c_{ij} v_{ij} b_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де b_{ij} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо здійснюється збір та сортування} \\ & i\text{-го виду відходів на } j\text{-му ЛПЗС,} \\ 0, & \text{якщо не здійснюється.} \end{cases} \quad (2)$$

Мінімізація витрат на транспортування:

$$C_{tr} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J c_{ijk} d_{jk} v_{ijk} b_{jk} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де b_{jk} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{якщо наявний маршрут перевезень} \\ & \text{від } j\text{-го ЛПЗС до } k\text{-го ПП,} \\ 0, & \text{якщо маршрут відсутній.} \end{cases} \quad (4)$$

Мінімізація витрат на перероблення:

$$C_{proc} = \sum_{i=1}^n c_{ik} v_{ik} b_{ik} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де b_{ik} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{якщо здійснюється перероблення} \\ & i\text{-го виду відходів на } k\text{-му ПП,} \\ 0, & \text{якщо не здійснюється.} \end{cases} \quad (6)$$

Тоді узагальнена цільова функція мінімізації витрат на ресайклінг СТ матиме вигляд:

$$C = C_{col} + C_{tr} + C_{proc} \rightarrow \min. \quad (7)$$

2. Цільова функція максимізації доходів від переробленої продукції має такий вигляд:

$$R = \sum_{k=1}^K r_k v_k \rightarrow \max. \quad (8)$$

3. Окремі цільові функції екологічного впливу під час збору та сортування (E_{col}), транспортування (E_{tr}) та перероблення (E_{proc}), відповідно, мають вигляд:

$$E_{col} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J e_{ij} v_{ij} b_{ij} \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$E_{tr} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J e_{ijk} v_{ijk} b_{jk} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$E_{proc} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n e_{ik} v_{ik} b_{ik} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Узагальнена цільова функція мінімізації екологічного впливу має такий вигляд:

$$E = E_{col} + E_{tr} + E_{proc} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Необхідно зважати на основні обмеження в задачі оптимізації, а саме:

1) кожен j -й локальний пункт ЛПЗС має обмеження за об'ємом відходів, що можуть бути перероблені за певний період:

$$\sum_{i=1}^n v_{ij} \leq V_{j \max}, \quad (13)$$

де $V_{j \max}$ – максимальний об'єм відходів, який може бути перероблений на j -му ЛПЗС за певний період;

2) централізовані заводи ПП мають обмеження за загальним об'ємом перероблення:

$$\sum_{i=1}^n v_{ik} \leq V_{k \max}, \quad (14)$$

де $V_{k \max}$ – максимальний об'єм відходів, що може бути перероблений на k -му ПП за певний період;

3) екологічні обмеження встановлюють максимально допустимий рівень впливу на довкілля, а саме:

$$E_{col} \leq E_{col \max}, \quad (15)$$

де $E_{col \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час збору та сортування на ЛПЗС;

$$E_{tr} \leq E_{tr \max}, \quad (16)$$

де $E_{tr \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час транспортування з ЛПЗС на ПП;

$$E_{proc} \leq E_{proc \max}, \quad (17)$$

де $E_{proc \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час перероблення на ПП.

Результати досліджень та їх обговорення

Залежно від умов і комбінації видів відходів можуть бути використані різні постановки оптимізаційної задачі та обмежень, але, на думку авторів, саме цільова функція мінімізації витрат на ресайклінг з огляду на обмеження, що характеризують виробничі потужності нижньої та середньої ланки підприємств з перероблення та дотримання вимог захисту довкілля й безпеки на виробництві, є найбільш актуальним завданням для більшості підприємств.

Можна виокремити кілька напрямів ресайклінгу СТ.

1. Знищення та поховання техніки. У цьому разі можливий значний негативний вплив на довкілля.

Особливістю цього напрямку є відсутність прибутку від реалізації проекту.

2. Комерціалізація ресайклінгу. Передбачає розбирання СТ на складники, оцінювання технічного стану, ремонт, модернізацію, зберігання та продаж. Цей напрям найбільш раціональний у процесі ресайклінгу СТ.

3. Перероблення СТ у вторинну сировину, яку можна використати повторно для створення нових зразків СТ.

Саме в разі перероблення високоприбуткових видів відходів (2-й і частково 3-й напрями) можливою є цільова функція максимізації доходу з огляду на обмеження витрат та екологічний вплив. Як приклад може бути розглянуто проєкт утилізації літака *Boeing-747* [15].

У цьому разі основними критеріями, що характеризують цей проєкт і використовуються в оптимізаційній моделі, є:

– цільова функція $max R$ – дохід від утилізації літака;

– обмеження C – фінансові витрати проєкту утилізації,

– E – критерій безпеки, що визначає вплив технологічного процесу та об'єкта ресайклінгу на довкілля і оператора.

Обмеженням цієї моделі є те, що вона не бере до уваги в явному вигляді часовий параметр, а саме витрати часу на виконання проєкту ресайклінгу СТ у межах сформованої інфраструктури.

Безумовно, бажано також зважати і на якість отриманої сировини та ризики утилізації. Крім цього, на етапі формалізації модель не бере до уваги втрати, що виникають під час технологічних процесів збору, сортування, транспортування та перероблення відходів.

Висновки

Ефективне управління процесами ресайклінгу складної техніки є актуальним завданням з огляду на необхідність сталого розвитку та збереження довкілля. У цій роботі проаналізовано підходи до організації

інфраструктури ресайклінгу складної техніки та запропоновано створення комбінованої системи, що поєднує централізовані та розподілені елементи.

Розроблена структурна модель інфраструктури ресайклінгу передбачає три основні рівні: нижній – сортувальні підприємства, середній – підприємства з перероблення відходів, верхній – керівний апарат для координації та контролю процесів.

Багаторівнева логістична інфраструктура ресайклінгу СТ має переваги, серед яких: гнучкість та стійкість системи завдяки поєднанню централізованих і децентралізованих елементів; мінімізація витрат на транспортування та підвищення ефективності всієї системи; належний контроль і координація процесів ресайклінгу для забезпечення екологічних вимог.

Отже, науковою новизною цієї статті є розроблення структурної та комплексу оптимізаційних моделей інфраструктури ресайклінгу СТ, які, на відміну від наявних, відтворюють ієрархічну структуру та беруть до уваги основні виробничо-економічні показники та екологічні вимоги процесів утилізації.

Упровадження математичної моделі оптимізації дає змогу зважати на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив тощо й обрати найбільш ефективну конфігурацію логістичної інфраструктури відповідно до поставлених цілей проєкту ресайклінгу.

Реалізація запропонованої інфраструктури ресайклінгу вимагатиме злагодженої взаємодії між державними органами, підприємствами, громадськими організаціями та міжнародними партнерами.

Перспективним напрямом дослідження є створення сучасної системи управління з дотриманням вимог *INDUSTRY 4.0* та цифрової трансформації виробництв із перероблення та утилізації складної техніки.

Успішне впровадження цього підходу не лише допоможе вирішити проблему накопичення відходів складної техніки в Україні, а й створить нові робочі місця, стимулюватиме розвиток інновацій та підвищить ресурсоефективність економіки загалом, забезпечуючи сталий розвиток нашої країни.

Список літератури

1. Jorgensen F. Recycling. 2019. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=NCC4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=recycling+what+is+it&ots=OtU5NWUYyB&sig=ks-PHTbp1X3tzEjRpFGHyAuzN6E&redir_esc=y#v=onepage&q=recycling%20what%20is%20it&f=false
2. Soto G. What is Infrastructure? Origins, turns and continuities of the concept. 2023. URL: https://www.scielo.cl/pdf/arq/n114/en_0717-6996-arq-114-4.pdf

3. The American heritage. Dictionary of the English Language, fifth edition. 2022. URL: <https://ahdictionary.com/word/search.html?q=infrastructure>
4. Круковська О. Логістика як інструмент ринкової економіки. *Серія: Економіка*, №19. 2024. С. 69–76. DOI: 10.32782/2708-0366/2024.19.9 (дата звернення: 4.04.2024).
5. Yken J., Boxall N., Cheng K., Nikoloski A, Moheimani N., Kaksonen A. E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania. *MDPI*, 2021. Vol. 11. №8. P. 1313. DOI: 10.3390/met11081313
6. Білокінь Ю. А. Моделі і метод формування комплексу робіт в проектах утилізації авіаційної техніки: дис. канд. техн. наук: 05.13.22. Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського "Харк. авіац. ін-т". Х., 2011. 209 с.
7. Novarlic B., Duric P. Enhancing Comprehensive Waste Management in Transition Economies through Green Logistics: A Case Study of Bosnia and Herzegovina. 2024. Vol. 3. №1. P. 42–55 URL: https://library.acadlore.com/JIMD/2024/3/1/JIMD_03.01_04.pdf
8. Parashar N., Hait S. Plastic Waste Management: Current Overview and Future Prospects. 2022. *Springer*, Vol. 104. P. 471–494. DOI: 10.1007/978-3-030-95542-7_22
9. Malovanyi G. Analysis of the socio-economic situation in Ukraine regarding the handling and processing of solid household waste (SHW). 2024. *Scientific Notes of Ostroh Academy National University, "Economics" series*, Vol. 32. № 60. P. 29–36, DOI: [https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32\(60\)-29-36](https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32(60)-29-36)
10. Харченко Т., Сагайдак Ю. Удосконалення системи переробки твердих побутових відходів в Україні. 2014. *Серія: Економіка*. № 165. С. 41–46. URL: http://bulletin-econom.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2015/11/165_41-46.pdf
11. Гобела В., Ганкевич І. Особливості застосування логістики рециклінгу на підприємстві. 2023. С. 26–28. URL: https://dSPACE.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/5724/1/12_05_2023.pdf
12. Білявський О. Проблеми утилізації твердих побутових відходів в Україні та методи їх вирішення. 2023. *Стратегія економічного розвитку України*. Vol. 52. С. 72–83. DOI: 10.33111/sedu.2023.52.072.083
13. Khrutba Y., Paranych P., Idziiev T. Сучасний стан та особливості розвитку ринку логістичних послуг в Україні. 2020. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Vol. 4. № 14. С. 129–136. DOI: 10.30837/ITSSI.2020.14.129
14. Beskorovainyi V., Kuropatenko O., Gobov D. Оптимізація маршрутів перевезень у системі замкненої логістики. 2019. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Vol. 4. № 10. С. 24–32. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.024
15. Бойченко С., Іванченко О., Яковлева А. Рециклінг і утилізація авіаційної техніки: світові тенденції та особливості впровадження. *Наукоємні технології*. Т. 34. № 2 (2017). С. 140–149. DOI: 10.18372/2310-5461.34.11612
16. Zanoletti A., Carena E., Ferrara C. Bontempi E. A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues. 2024. *MDPA*, Vol. 10. №1. 38 p. DOI: 10.3390/batteries10010038
17. Efstratiadis V., Michailidis N. Sustainable Recovery, Recycle of Critical Metals and Rare Earth Elements from Waste Electric and Electronic Equipment (Circuits, Solar, Wind) and Their Reusability in Additive Manufacturing Applications: A Review. 2022. *MDPA*, Vol. 12. №5. P. 794. DOI: 10.3390/met12050794
18. Hamawand I., Yusaf T., Rafat S. Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent. 2013. *MDPA*, Vol. 6. №2. P. 1023–1049. DOI: 10.3390/en6021023
19. Wen X., Jianhong Y., Huaiping F., Jiangteng Z., Yuedong K. Classifying construction and demolition waste by combining spatial and spectral features. 2020. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 173. №3. P. 79–90. DOI: 10.1680/jwarm.20.00008

References

1. Jorgensen, F. (2019), "Recycling". available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=NCC4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=recycling+what+is+it&ots=OTU5NWUYyB&sig=ks-PHTbp1X3tzEjRpFGHyAuzN6E&redir_esc=y#v=onepage&q=recycling%20what%20is%20it&f=false
2. Soto, G. (2023), "What is Infrastructure? Origins, turns and continuities of the concept". available at: https://www.scielo.cl/pdf/arq/n114/en_0717-6996-arq-114-4.pdf
3. "The American heritage. Dictionary of the English Language, fifth edition". (2022), available at: <https://ahdictionary.com/word/search.html?q=infrastructure>

4. Krukovska, O. (2024), "Logistics as a tool of market economy". *Series: Economics*, No. 19. P. 69–76. DOI: 10.32782/2708-0366/2024.19.9
5. Yken, J., Boxall, N., Cheng, K., Nikoloski, A., Moheimani, N., Kaksonen, A. (2021), "E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania". *MDPI*, Vol. 11. No. 8. P. 1313. DOI: 10.3390/met11081313
6. Bilokin, Y. (2011), "Models and method of formation of work complex in aircraft recycling project", Ph. D. Thesis., Kharkiv, 209 p.
7. Novarlic, B., Duric, P. (2024), "Enhancing Comprehensive Waste Management in Transition Economies through Green Logistics: A Case Study of Bosnia and Herzegovina". Vol. 3. No. 1. P. 42–55 available at: https://library.acadlore.com/JIMD/2024/3/1/JIMD_03.01_04.pdf
8. Parashar, N., Hait, S. (2022), "Plastic Waste Management: Current Overview and Future Prospects". *Springer*, Vol. 104. P. 471–494. DOI: 10.1007/978-3-030-95542-7_22
9. Malovanyi, G. (2024), "Analysis of the socio-economic situation in Ukraine regarding the handling and processing of solid household waste (SHW)". *Scientific Notes of Ostroh Academy National University, "Economics" series*, Vol. 32. No. 60. P. 29–36 DOI: [https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32\(60\)-29-36](https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32(60)-29-36)
10. Kharchenko, T., Sahaidak, Y. (2014), "Improving the system of solid waste recycling in Ukraine". *Series: Economics*. No. 165. P. 41–46. available at: http://bulletin-econom.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2015/11/165_41-46.pdf
11. Gobela, V., Gankevich, I. (2023), "Features of recycling logistics application at the enterprise". P. 26–28. available at: https://dSPACE.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/5724/1/12_05_2023.pdf
12. Bilyavsky, O. (2023), "Problems of Solid Waste Disposal in Ukraine and Methods of Their Solution". *Strategy of economic development of Ukraine*. Vol. 52. P. 72–83. DOI: 10.33111/sedu.2023.52.072.083
13. Khrutba, Y., Paranich, P., Idziiev, T. (2020), "Current state and peculiarities of development of the logistics services market in Ukraine". *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. Vol. 4. No. 14. P. 129–136. DOI:10.30837/ITSSI.2020.14.129
14. Beskorovainyi, V., Kuropatenko, O., Gobov, D. (2019), "Optimization of transportation routes in the closed logistics system". *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. Vol. 4. No. 10. P. 24–32. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.024
15. Boichenko, S., Ivanchenko, O., Iakovlieva, A. (2017) "Recycling and utilization of aviation engineering: the global trends and peculiarities of introduction", *Science-Based Technologies*. Vol. 34. No. 2. P. 140-149. DOI: 10.18372/2310-5461.34.11612
16. Zanoletti, A., Carena, E., Ferrara, C. Bontempi, E. (2024), "A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues". *MDPA*, Vol. 10. No. 1. P. 38 DOI: 10.3390/batteries10010038
17. Efstratiadis, V., Michailidis, N. (2022), "Sustainable Recovery, Recycle of Critical Metals and Rare Earth Elements from Waste Electric and Electronic Equipment (Circuits, Solar, Wind) and Their Reusability in Additive Manufacturing Applications: A Review". *MDPA*, Vol. 12. No. 5. P. 794. DOI: 10.3390/met12050794
18. Hamawand, I., Yusaf, T., Rafat, S. (2013), "Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent". *MDPA*, Vol. 6. No. 2. P. 1023–1049. DOI: 10.3390/en6021023
19. Wen, X., Jianhong, Y., Huaiying, F., Jiangteng, Z., Yuedong, K. (2020), "Classifying construction and demolition waste by combining spatial and spectral features". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 173. No. 3. P. 79–90. DOI: 10.1680/jwarm.20.00008

Надійшла (Received) 15.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Кікоть Максим Сергійович – Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "ХАІ", аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: maxum111111@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-7554-9246>

Малєєва Юлія Анатоліївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: juliabelokon84@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-9156>

Kikot Maksym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Malieieva Julia – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

MODELS OF FORMING LOGISTICS INFRASTRUCTURE FOR COMPLEX EQUIPMENT RECYCLING

Subject matter: models for forming the logistics infrastructure for complex equipment recycling. The work aims to create optimization models that consider key factors in forming recycling infrastructure and combine centralized and decentralized elements to enhance the efficiency of this process. **Tasks:** analyze modern approaches to organizing complex equipment recycling; identify criteria and factors for optimizing recycling infrastructure; develop a multi-level recycling infrastructure; formulate optimization models for recycling infrastructure, taking into account enterprise production capacities, logistical costs, environmental impact, and other factors. **Methods:** a systems approach, structural modeling, optimization models. **Research results:** approaches to organizing recycling infrastructure were analyzed: centralized, distributed, and combined; the selection of a combined approach for creating logistics infrastructure for complex equipment recycling was justified; a structural multi-level model of recycling infrastructure was developed with a lower level (sorting enterprises), middle level (processing enterprises), and upper level (organizational management); mathematical models for optimizing recycling infrastructure were formulated, considering enterprise production capacities, logistical costs, and environmental impact. **The conclusions:** proposed structural multi-level model of complex equipment recycling infrastructure combines the advantages of centralized and decentralized management, ensuring flexibility, system reliability against external influences, cost minimization, and sustainable process control. The application of the developed optimization models allows for consideration of enterprise production capacities, logistical costs, environmental impact, and other factors to find the most effective configuration of recycling infrastructure. Implementation of the proposed recycling infrastructure will ensure the formation of coherent interaction between government bodies, enterprises, public organizations, and international partners.

Keywords: complex equipment recycling; combined infrastructure; logistics; environmental impact; production capacities.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Кікоть М. С., Малєєва Ю. А. Моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>

Kikot, M., Malieieva, Y. (2024) "Models of forming logistics infrastructure for complex equipment recycling", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>

О. КОМЕНЧУК

АДАПТИВНІ МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СЕГМЕНТАЦІЇ СТОМАТОЛОГІЧНИХ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗНІМКІВ

Предметом дослідження в статті є ефективність адаптивних методів попереднього оброблення медичних зображень, зокрема білатерального фільтра та модифікованого CLAHE, у задачах сегментації стоматологічних рентгенівських знімків. Ці методи дають змогу зберігати важливі деталі зображення та ефективно зменшувати шум, навіть у разі високої варіативності зображень, що надходять із різних джерел. **Мета роботи** – розроблення покращень методів попереднього оброблення медичних зображень, а саме білатерального фільтра та CLAHE, з огляду на контекст зображення. Дослідження спрямоване на підвищення ефективності сегментації медичних знімків за допомогою збереження важливих деталей і зменшення впливу шуму й артефактів у зображеннях із різних джерел. У статті **розв'язуються завдання**: експериментальне порівняння розроблених адаптивних методів попереднього оброблення з традиційними підходами; оцінювання ефективності сегментації за допомогою метрик, таких як коефіцієнт Дайса (*Dice Score*), коефіцієнт Жаккара (*IoU Score*), влучність (*Precision*) та чутливість / повнота (*Recall*); аналіз впливу попереднього оброблення на якість сегментації. **Впроваджено такі методи**: математичне моделювання, тренування нейронної мережі на основі моделі *U-Net* із попередньо натренованим енкодером *timm-resnest101e*, масштабування зображень до 512×512 пікселів, навчання з фіксованим *learning rate* 0.001. **Досягнуті результати**. Під час експериментального порівняння розроблених адаптивних методів попереднього оброблення з традиційними підходами встановлено, що комбіноване використання адаптивного білатерального фільтра та модифікованого CLAHE забезпечило найвищі показники якості сегментації. Зокрема, за метриками коефіцієнт Дайса (*Dice Score*) 0.9603 та коефіцієнт Жаккара (*IoU Score*) 0.94501 ці методи перевершили традиційні, що свідчить про їх ефективність у збереженні контурів об'єктів та зниженні шуму. **Висновки**. Застосування розроблених адаптивних методів попереднього оброблення суттєво покращує точність сегментації медичних зображень. Комбінований підхід, що передбачає адаптивний білатеральний фільтр і модифікований CLAHE, є найбільш ефективним для завдань медичної візуалізації, що підвищує точність діагностики та надійність автоматизованих систем підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: штучний інтелект; глибоке навчання; сегментація зображень; медичні зображення; попереднє оброблення; CLAHE; білатеральний фільтр.

Вступ

У сучасній медицині аналіз різноманітних показників відіграє ключову роль у діагностиці та плануванні лікування пацієнтів. Окрім того, медична інформація, широко подана не лише у вигляді табличних чи текстових показників, а й у значній кількості зображень медичної візуалізації, до яких належить рентгенографія, МРТ, КТ, УЗД тощо. Особливо це стосується стоматології, де панорамні чи прицільні рентгенівські знімки дають змогу отримати детальний огляд зубного ряду та всіх прилеглих структур. Важливість автоматизації аналізу таких знімків зростає з кожним роком, оскільки це підвищує точність діагностики, зменшує час на оброблення інформації та забезпечує більш якісне лікування. Однак для успішного застосування алгоритмів аналізу таких знімків, зокрема алгоритмів

комп'ютерного зору, необхідно брати до уваги високу варіативність якості зображень, наявність артефактів та різного роду шуму, що можуть негативно впливати на ефективність і точність таких алгоритмів.

У попередньому дослідженні авторів [1] проведено комплексний огляд та практичне порівняння методів попереднього оброблення панорамних стоматологічних рентгенівських знімків з метою покращення точності сегментації зубних пломб. Було розглянуто кілька найбільш популярних та ефективних фільтрів, зокрема CLAHE, білатеральний фільтр, фільтр Гаусса та багатомасштабний фільтр *Retinex* з відновленням кольору (*MSRCR – Multi-scale Retinex with Color Restoration*). Результати дослідження показали, що використання білатерального фільтра забезпечує найкращі результати за більшістю метрик, зокрема за коефіцієнтом Дайса (*Dice Score*) та індексом Жаккара (*IoU*). Водночас фільтр CLAHE показав

високі результати щодо повноти (*Recall*) моделі, що є критичним у завданнях, де важливо мінімізувати кількість пропущених цільових об'єктів [1]. Попри ці практичні результати, дослідження також довели необхідність удосконалення підходів до попереднього оброблення зображень для підвищення точності та надійності алгоритмів сегментації в умовах варіативності медичних знімків.

Одним із важливих викликів, що були розглянуті в праці авторів [1], є складнощі з налаштуванням параметрів фільтрів попереднього оброблення, таких як білатеральний фільтр та CLANE, для різних типів зображень. За замовчуванням ці параметри є фіксованими для всіх зображень набору даних [2], це може бути оптимально для набору зображень, що надходять з одного джерела, наприклад, з одного діагностичного апарата, але це може не підходити для наборів даних з інших джерел через розбіжності в яскравості, контрасті, рівні шуму та наявності артефактів (рис. 1).

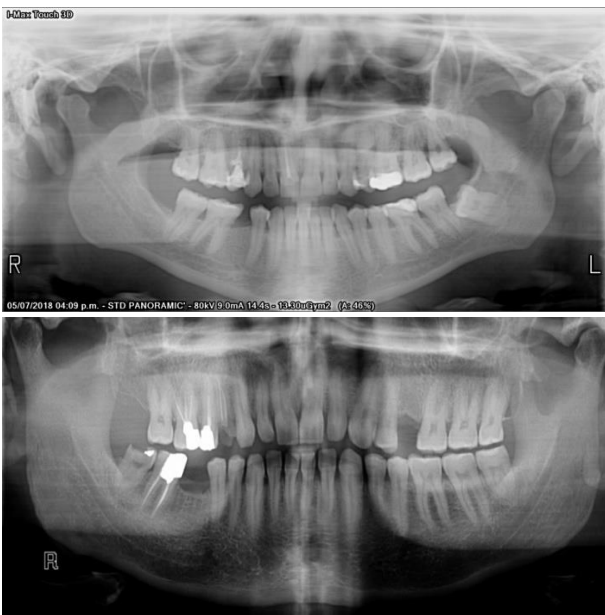


Рис. 1. Порівняння рентгенівських зображень із різних джерел з варіаціями в яскравості, контрасті та рівні шуму [3]

Така ситуація може призводити до зниження точності алгоритмів комп'ютерного зору або появи артефактів, що спотворюватимуть результати.

Отже, виникає питання в покращенні методів попереднього оброблення медичних знімків з метою автоматичного налаштування параметрів фільтрів відповідно до характеристик знімків. Використання контексту зображення для адаптивного налаштування параметрів попереднього оброблення може значно

покращити якість вихідного зображення, що зі свого боку підвищить точність і надійність алгоритмів та моделей комп'ютерного зору.

Метою цього дослідження є розроблення покращень методів попереднього оброблення медичних зображень, зокрема білатерального фільтра та CLANE, на основі контексту зображення. Передбачається, що такий підхід дасть змогу значно підвищити ефективність розпізнавання об'єктів на зображеннях, зокрема у задачі сегментації медичних знімків, зберігаючи важливі деталі та зменшуючи вплив шуму й артефактів на показниках із різних джерел.

Недоліки базових методів попереднього оброблення та необхідність удосконалення

Базові методи попереднього оброблення зображень, зокрема білатеральний фільтр і CLANE, є важливими інструментами в обробленні медичних зображень. Такі фільтри широко використовуються для зменшення шуму, покращення контрасту та збереження деталей у зображеннях, що особливо важливо для точного аналізу та діагностики [4]. Проте в контексті варіативності наборів даних, наприклад, якщо медичні знімки були зроблені різними пристроями та різняться за якістю, ці методи мають низку недоліків, що обмежують їх ефективність і вимагають удосконалення.

Білатеральний фільтр, що поєднує просторове згладжування та згладжування за інтенсивністю пікселів, має фіксовані параметри σ_s та σ_r , які однаково застосовуються до всього зображення [4, 5]. Це може бути проблемою, оскільки різні ділянки зображення мають неоднакові характеристики. Зокрема ділянки з високою деталізацією (наприклад, контури зубів) можуть вимагати меншого ступеня згладжування для збереження деталей, тоді як однорідні ділянки можуть потребувати більшого згладжування для ефективного усунення шуму (рис. 2).

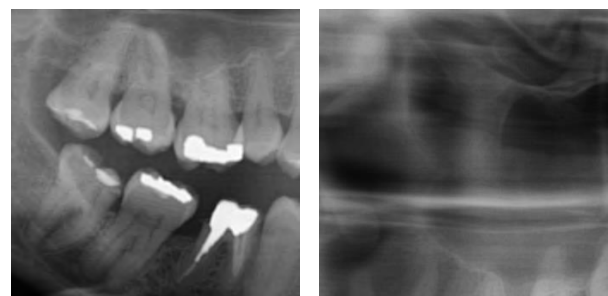


Рис. 2. Приклад різного ступеня деталізації в різних частинах медичного зображення

Фіксовані параметри не дають змогу адаптувати фільтрацію до локальних особливостей зображення, що призводить до втрати важливих деталей або недостатнього зменшення шуму. Окрім того, фіксовані параметри білатерального фільтра можуть спричинити розмивання країв об'єктів, що критично в ситуаціях, коли необхідно чітко розрізнити різні анатомічні структури, наприклад зубні пломби. Це особливо проблематично для медичних зображень, де контури є ключовими для діагностики.

Щодо CLANE, то цей фільтр покращує контраст зображення, обмежуючи посилення інтенсивності в локальних ділянках, що дає змогу уникнути глобальних спотворень [6]. Проте фіксований розмір сітки та *clip limit* можуть не відповідати різним ділянкам зображення з неоднаковою текстурою та яскравістю. Це, ймовірно, спричинить перенасичення контрасту в окремих ділянках, особливо у висококонтрастних ділянках, що може викликати появу артефактів або втрату важливих деталей у зонах із низьким контрастом (рис. 3).

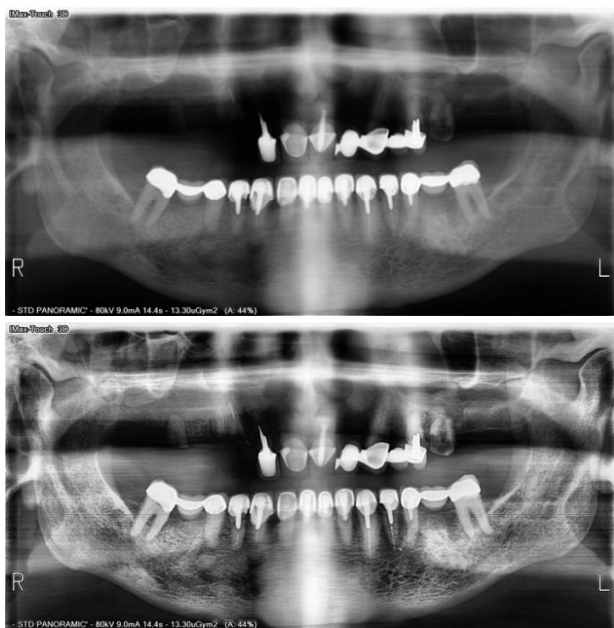


Рис. 3. Приклад перенасичення зображення з використанням фіксованих параметрів фільтра CLANE [7]

У разі зображень із різною текстурою фіксований розмір сітки може не забезпечувати належний рівень деталізації. Великі блоки здатні пропускати дрібні деталі, тоді як маленькі блоки можуть підсилювати шум або інші артефакти. Відсутність змінюваної адаптивності до текстурних

змін ускладнює забезпечення оптимального контрасту по всьому зображенню [8].

З огляду на перелічені недоліки стає очевидним, що базові методи попереднього оброблення, такі як білатеральний фільтр і CLANE, мають бути вдосконалені для досягнення більш високої точності та надійності аналізу медичних зображень. Основна ідея полягає в тому, щоб зробити ці методи більш адаптивними до локальних особливостей зображення. Це дасть змогу забезпечити оптимальне згладжування, збереження важливих деталей і покращення контрасту в неоднакових умовах та на різних ділянках одного й того самого зображення.

Пропонується один із перспективних напрямів удосконалення, а саме покращення методів попереднього оброблення на основі контексту зображення. Очікується, що такі методи покращення здатні динамічно налаштовувати параметри оброблення залежно від локальних характеристик зображення, що забезпечує кращу якість попереднього оброблення. Удосконалення базових методів попереднього оброблення є важливим кроком у підвищенні точності та надійності медичних досліджень, що використовують зображення різного роду.

Покращення методів попереднього оброблення на основі контексту зображення

Покращення методів попереднього оброблення зображень на основі контексту дають змогу динамічно налаштовувати параметри фільтрів залежно від локальних характеристик кожної ділянки зображення. Це забезпечує більшу гнучкість та ефективність, якщо порівнювати з традиційними методами, де параметри є фіксованими для всього зображення. Запропоновані покращення попереднього оброблення особливо актуальні для медичних зображень, де важливо зберігати тонкі деталі, наприклад краї та текстури, водночас ефективно усуваючи шум і підвищуючи контраст важливих деталей. Далі наведено детальний огляд запропонованих удосконалень разом із математичною основою, що обґрунтовує їх ефективність.

Білатеральний фільтр – це техніка, яка згладжує зображення, зберігаючи краї, що має вирішальне значення для медичної візуалізації, де важливо зберегти цілісність анатомічних меж. Стандартний білатеральний фільтр працює за допомогою поєднання просторової близькості та подібності інтенсивності, що призводить до середньозваженого значення

інтенсивності пікселів, яке бере до уваги і просторову, і фотометричну відстань між пікселями [9].

$$I_{filtered}(x) = \frac{1}{W(x)} \sum_{y \in \Omega} I(y) \cdot \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma_s^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|I(x)-I(y)|^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (1)$$

де $I(x)$ – інтенсивність пікселя x ;

$I(y)$ – інтенсивність пікселя в позиції y

(де y – це сусідня точка навколо x в ділянці Ω);

x – це піксель, для якого проводиться фільтрація;

y – це сусідній піксель у ділянці Ω , яка охоплює

пікселі навколо x ;

$W(x)$ – коефіцієнт нормування;

σ_s – контролює просторову протяжність фільтра;

σ_r – контролює діапазон подібності інтенсивності.

Білатеральний фільтр застосовується до зображення таким чином:

1. Просторовий фільтр (компонент з σ_s) зменшує вплив пікселів, розташованих далеко від точки x . Що ближче сусідній піксель y , то більше він впливає на результат фільтрації.

2. Радіометричний фільтр (компонент з σ_r) зменшує вплив сусідніх пікселів, які мають значну різницю в інтенсивності з пікселем x . Це важливо для збереження контрастних країв, оскільки пікселі з різкою зміною інтенсивності мають менший вплив.

3. Після множення інтенсивностей пікселів $I(x)$ на їх ваги результат нормується за допомогою нормувального фактора $W(x)$, щоб отримати збалансоване значення інтенсивності після фільтрації.

У традиційному білатеральному фільтрі параметри σ_s та σ_r фіксуються по всьому зображенню [11]. Однак, як було розглянуто попередньо, медичні зображення часто містять ділянки з різними характеристиками, наприклад з дрібними деталями та інші, з більш однорідними текстурами. Щоб розв'язати цю проблему, пропонується адаптивне налаштування білатерального фільтра на основі контексту зображення, що змінює ці параметри, спираючись на локальні властивості зображення.

Пропонується впровадити адаптивний σ_s , що дає змогу фільтру динамічно регулювати свій просторовий вплив залежно від величини градієнта в локальній ділянці. Вищі градієнти, що вказують на краї, передбачають менший σ_s , щоб зберегти різкість країв.

Білатеральний фільтр для пікселя $I(x)$ можна подати за допомогою формули [10]

$$\sigma_s(x) = \sigma_{s0} \left(1 - \frac{\|\nabla I(x)\|}{\max(\|\nabla I(x)\|)} \right), \quad (2)$$

де σ_{s0} – базовий або початковий параметр згладжування;

$\nabla I(x)$ – градієнт інтенсивності зображення в точці x ;

$\|\nabla I(x)\|$ – величина градієнта в пікселі x , яку можна обчислити за допомогою операторів *Sobel* або подібних;

$\max(\|\nabla I(x)\|)$ – максимальне значення градієнта по всьому зображенню.

Запропоновані покращення передбачають:

1. Формула адаптує $\sigma_s(x)$ залежно від величини градієнта. Якщо градієнт у точці x великий (наприклад, точка належить до краю об'єкта), то параметр $\sigma_s(x)$ зменшується, щоб зменшити згладжування, зберігаючи важливі деталі, наприклад краї.

2. Якщо градієнт малий (ділянка без значної зміни інтенсивності, як-от в однорідних ділянках зображення), то $\sigma_s(x)$ наближається до σ_{s0} , уможливаючи більш сильне згладжування.

Так само σ_r регулюється на основі локального рівня шуму, що можна визначити з відхилення в межах локального вікна. Регіони з більшою дисперсією (що вказує на шум) отримують більшу σ_r , покращуючи зниження шуму.

$$\sigma_r(x) = \sigma_{r0} \frac{\text{Var}(I(y \in \Omega))}{\max(\text{Var}(I(y \in \Omega)))}, \quad (3)$$

де σ_{r0} – базове (початкове) значення параметра, яке потім коригується залежно від варіації інтенсивності в ділянці навколо пікселя x ;

$\text{Var}(I(y \in \Omega))$ – варіація (дисперсія) інтенсивності пікселів у вікні Ω , яке охоплює ділянку навколо пікселя x ;

$\max(\text{Var}(I(y \in \Omega)))$ – максимальне значення варіації інтенсивності серед усіх ділянок зображення.

Запропоновані покращення передбачають:

1. Якщо в ділянці Ω навколо пікселя x є висока варіація інтенсивності (наприклад, ділянка з контрастними елементами або краями), тоді значення $\sigma_r(x)$ збільшується, що дає змогу радіометричному фільтру зберігати ці зміни інтенсивності та уникати згладжування важливих деталей.

2. Якщо варіація в ділянці незначна (ділянка однорідна за інтенсивністю), тоді значення $\sigma_r(x)$ буде зменшуватись, що уможливує більшу кількість згладжування.

Отже, запропоновані адаптивні налаштування дають змогу білатеральному фільтру бути більш гнучким і реагувати на локальний контекст зображення. Ця гнучкість зберігає дрібні деталі в складних ділянках (наприклад, краї зубних пломб на перетині з іншими зубами), одночасно ефективно згладжуючи однорідні ділянки та зменшуючи шум, де це необхідно (наприклад, на краях зображення).

Щодо фільтра CLANE, то він покращує стандартне вирівнювання гистограми, застосовуючи локальне посилення контрасту, запобігаючи надмірному посиленню шуму. Однак ефективність CLANE значною мірою залежить від таких параметрів, як *clip limit* та розмір сітки фрагментів, які зазвичай є фіксованими для всього зображення.

Метод CLANE працює за допомогою обчислення кумулятивної функції розподілу інтенсивності пікселів у межах локального блоку, а потім відтворення цих інтенсивностей для підвищення контрастності. Базове перетворення CLANE для пікселя $I(x)$ визначається за формулою [12]:

$$I_{clane}(x) = \frac{CDF(I(x)) - CDF_{\min}}{CDF_{\max} - CDF_{\min}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min}, \quad (4)$$

де $CDF(I(x))$ – кумулятивне значення функції розподілу (*Cumulative Distribution Function*, CDF) за умови інтенсивності $I(x)$;

$$TileSize(x) = TileSize_0 \left(1 - \frac{Texture(I(y \in \Omega))}{\max(Texture(I(y \in \Omega)))} \right), \quad (6)$$

де $TileSize_0$ – розмір базової сітки блоку;

$Texture(I(y \in \Omega))$ – міра складності текстури, яку можна оцінити за допомогою таких показників, як локальна дисперсія або ентропія.

Запропоновані адаптивні стратегії забезпечують оптимальне застосування покращення контрастності

CDF_{\min} та CDF_{\max} – мінімальне й максимальне значення кумулятивної функції розподілу в блоці;

I_{\max} та I_{\min} – максимальна й мінімальна інтенсивності на зображенні (зазвичай 0 або 255 для 8-бітних зображень).

Опишемо принцип роботи фільтра CLANE.

1. Формула виконує нормалізацію значення інтенсивності $I(x)$ щодо кумулятивної функції розподілу $CDF(I(x))$ в локальному вікні. Це дає змогу регулювати контраст зображення на локальному рівні (у межах незначної ділянки зображення), уникаючи глобального вирівнювання, яке може призвести до надмірного посилення шуму або викривлення контрасту.

2. Далі результуюче значення масштабується до діапазону інтенсивностей від I_{\min} до I_{\max} з метою відновлення яскравості після нормалізації.

3. CLANE обмежує вирівнювання гистограми, тобто в разі дуже високого локального контрасту (наприклад, у краях або сильно варіативних текстурованих ділянках) контраст не буде надмірно збільшено.

Щоб підвищити ефективність фільтра CLANE, запроваджуємо адаптивність параметра *clip limit* та розміру сітки фрагментів на основі локальних характеристик зображення.

$$ClipLimit(x) = ClipLimit_0 \frac{\text{Mean}(I(y \in \Omega))}{\max(\text{Mean}(I(y \in \Omega)))}, \quad (5)$$

де $ClipLimit_0$ – базове значення *clip limit*;

$\text{Mean}(I(y \in \Omega))$ – середня інтенсивність у локальному сусідстві Ω .

Розмір сітки визначає розмір локальних блоків, до яких застосовується вирівнювання гистограми. У зонах із високою складністю текстур краще використовувати менші блоки для збереження деталей. І навпаки, на однорідних ділянках більші блоки допомагають уникнути надмірного оброблення.

в різних ділянках зображення. У ділянках, де потрібно зберегти дрібні деталі, адаптивний розмір сітки гарантує посилення контрасту без внесення артефактів. Водночас адаптивні обмеження *clip limit* запобігають перенасиченню яскравих ділянок і покращують видимість у темніших ділянках, роблячи зображення більш корисним для діагностики.

Окрім того, пропонується комбіноване використання адаптивної білатеральної фільтрації та модифікованого CLAHE, що є покращеним підходом до попереднього оброблення медичних зображень, який оптимізує зменшення шуму та покращення контрастності з огляду на контекст зображення. Адаптивність цих методів дає змогу їм добре працювати з різноманітними зображеннями, що надходять із різних джерел, у роботі з якими зниження шуму і збереження деталей є критичними для подальшого аналізу.

Отже, пропонується таке комбіноване використання покращених методів попереднього оброблення зображень:

$$I_{filtered} = \text{AdaptiveBilateralFilter}(I_{orig}, \sigma_s(x), \sigma_r(x)), \quad (7)$$

$$I_{enhanced} = \text{ModifiedCLAHE}(I_{filtered}, \text{ClipLimit}(x), \text{TileSize}(x)). \quad (8)$$

Запропоноване використання покращених методів попереднього оброблення гарантуватиме, що зображення спочатку згладжується таким чином, щоб зберегти важливі деталі, а потім його контраст посилюється в такий спосіб, щоб підтримувати цілісність зображення та виділення основних деталей.

Отже, покращення методів попереднього оброблення медичних зображень, описані в цій статті, підкріплені математичною основою, забезпечуватимуть суттєве вдосконалення порівняно з традиційними методами. Завдяки динамічному регулюванню параметрів на основі локального контексту зображення запропоновані методи забезпечують чудову продуктивність щодо зменшення шуму, збереження країв і посилення контрастності. Такі вдосконалення є особливо корисними для медичної візуалізації, де точність і якість зображення безпосередньо впливають на результати алгоритмів комп'ютерного зору.

Результати дослідження

У процесі дослідження впроваджено покращені методи попереднього оброблення медичних зображень на основі адаптивного налаштування параметрів на основі контексту зображення. Зокрема було використано напрацювання з попередньої роботи авторів [1], а саме для задачі сегментації панорамних стоматологічних рентгенівських знімків. Далі запропоновано аналіз результатів, досягнутих унаслідок експериментального оцінювання.

Ефективність розроблених адаптивних методів попереднього оброблення оцінювалася за допомогою

1. Зменшення шуму за допомогою запропонованої адаптивної білатеральної фільтрації: застосовується для зменшення шуму, зберігаючи межі та динамічно регулюючи параметри на основі локального градієнта та характеристик шуму.

2. Підвищення контрастності за допомогою модифікованого CLAHE на основі контексту зображення: застосовується для підвищення контрастності, оптимізуючи обмеження *clip limit* та розмір сітки відповідно до локальної яскравості та текстур зображення.

Нехай I_{orig} буде оригінальним зображенням, тоді розроблені покращені етапи попереднього оброблення можна підсумувати так:

кількох ключових показників: коефіцієнта Дайса (*Dice Score*), коефіцієнта Жаккара (*Jaccard Index* або *IoU*), влучності (*Precision*) і чутливості / повноти (*Recall*). Ці показники дають повну уяву про те, наскільки добре працює модель сегментації, що натренована на знімках після попереднього оброблення за допомогою покращених методів порівняно з традиційними.

Для проведення експериментів у межах цього дослідження використовувалася модель *U-Net* [13], що є однією з найбільш популярних архітектур для задач сегментації зображень. Вибір цієї моделі зумовлений її здатністю ефективно захоплювати контекст на різних масштабах, що є особливо важливим для медичних зображень, де необхідно зберігати високу деталізацію анатомічних структур. Важливим аспектом експериментального налаштування є те, що воно залишено незмінним порівняно з попереднім дослідженням [1], щоб забезпечити наочність і порівнюваність результатів.

Усі зображення для сегментації були масштабовані до розміру 512×512 пікселів, що дало змогу зберегти баланс між деталізацією та ефективністю обчислень. Для підвищення точності сегментації використовувався передтренований енкодер *timm-resnet101e* [14], що забезпечує високу якість екстракції ознак завдяки своїй глибокій архітектурі та застосуванню попереднього навчання на великому наборі зображень. Крім того, для оптимізації навчання моделі використовувався фіксований *learning rate* на рівні 0.001, що є оптимальним для забезпечення стабільного процесу

навчання, а також упроваджувалися методи аргументації зображень [15].

Збереження експериментальних налаштувань дало змогу порівняти результати, досягнуті з використанням адаптивних методів передоброблення, з попередніми дослідженнями, де впроваджувалися традиційні методи передоброблення [16]. Це доводить

об'єктивність і надійність висновків, сформульованих у дослідженні, і демонструє переваги адаптивних підходів у задачах медичної сегментації.

Далі наведено табл. 1, яка відтворює результати застосування розроблених адаптивної білатеральної фільтрації та покращеного CLAHE порівняно з традиційними методами попереднього оброблення.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз ефективності адаптивних і традиційних методів попереднього оброблення в задачах медичної сегментації

Назва фільтра	Dice Score	IoU Score	Precision	Recall	Loss
Традиційний білатеральний фільтр	0.94493	0.928249	0.995193	0.982434	0.0031
Традиційний фільтр CLAHE	0.926958	0.912003	0.982922	0.995365	0.0036
Адаптивний білатеральний фільтр	0.95992	0.93001	0.99801	0.982678	0.0027
Покращений фільтр CLAHE	0.94812	0.92995	0.99567	0.997898	0.0031
Комбінований підхід (адаптивний білатеральний фільтр + покращений CLAHE-фільтр)	0.9603	0.94501	0.9991	0.985397	0.0026
Без фільтра	0.912757	0.90474	0.985562	0.98341	0.0037

Аналіз результатів, поданих у табл. 1, демонструє значний вплив адаптивних методів попереднього оброблення на підвищення ефективності сегментації медичних зображень. Зокрема, використання адаптивного білатерального фільтра забезпечило найвищі значення показників *Dice Score* та *IoU Score*, досягаючи 0.95992 та 0.93001 відповідно. Ці результати суттєво перевищують показники, добуті внаслідок упровадження традиційних методів попереднього оброблення, таких як класичний білатеральний фільтр і традиційний CLAHE. Наприклад, для традиційного білатерального фільтра *Dice Score* становив 0.94493, а *IoU Score* – 0.928249. Аналогічно традиційний CLAHE-фільтр демонстрував *Dice Score* на рівні 0.926958 та *IoU Score* 0.912003.

Адаптивний підхід до попереднього оброблення показав значно кращі результати за показниками *Precision* і *Recall*, що вказує на ефективніше усунення шуму за умови збереження критично важливих деталей зображення. Зокрема, *Precision* для адаптивного білатерального фільтра становив 0.99801, що вказує на мінімальну кількість хибнопозитивних спрацювань, а *Recall* залишився на високому рівні – 0.982678, що демонструє здатність методу захоплювати всі важливі структури на зображенні.

Важливо зазначити, що використання покращеного CLAHE-фільтра також продемонструвало значні покращення, якщо порівнювати традиційні підходи. Добуті значення *Dice Score* 0.94812 та *IoU Score* 0.92995 підтверджують ефективність цього методу в покращенні контрастності та збереженні структур зображення. Застосування покращеного CLAHE-фільтра

також дало змогу досягти високих значень *Precision* (0.99567) та *Recall* (0.997898), що свідчить про його здатність ефективно підвищувати якість сегментації в критичних ділянках зображення.

Особливо важливими є результати, досягнуті під час використання комбінованого підходу, що передбачає адаптивний білатеральний фільтр і покращений CLAHE-фільтр. Цей підхід дав змогу досягти максимальних значень *Dice Score* та *IoU Score* серед усіх досліджених методів – 0.9603 та 0.94501 відповідно. Крім того, *Precision* у цьому разі становив 0.9991, а *Recall* – 0.985397, що є найкращими результатами серед усіх описаних методів. Це вказує на те, що комбінований підхід не лише зберігає критичні деталі зображення, але й мінімізує кількість хибнопозитивних і хибнонегативних спрацювань.

Навпаки, відсутність фільтрації призвела до значного погіршення якості сегментації, що виявилось в найнижчих значеннях усіх показників, зокрема *Dice Score* 0.912757 та *IoU Score* 0.90474. Високе значення *Loss* (0.0037) також свідчить про нестабільність сегментації за відсутності попередньої фільтрації, що підтверджує важливість застосування попереднього оброблення для підвищення якості результатів.

Отже, дослідження довело, що адаптивні методи попереднього оброблення, особливо у поєднанні, є більш ефективними для задач медичної сегментації зображень порівняно з традиційними підходами або відсутністю фільтрації. Комбінований підхід, що передбачає адаптивний білатеральний фільтр і покращений CLAHE-фільтр, продемонстрував найвищі

показники якості, що робить його оптимальним вибором для застосування в медичній галузі, де точність і надійність є критично важливими.

Висновки

Запропоновані в цьому дослідженні методи адаптивного попереднього оброблення медичних зображень, зокрема покращений білатеральний фільтр і модифікований CLAHE, продемонстрували значне підвищення ефективності сегментації зображень на панорамних стоматологічних рентгенівських знімках. Комбіноване впровадження цих методів дало змогу досягти найвищих показників за такими критеріями, як коефіцієнт Дайса (*Dice Score*), коефіцієнт Жаккара (*IoU Score*), влучність (*Precision*) і чутливість / повнота (*Recall*). Це свідчить про здатність адаптивних методів не лише зберігати важливі деталі зображення, але й ефективно зменшувати шум, що є критично важливим у задачах сегментації, де точність визначення меж об'єктів безпосередньо впливає на якість діагностики.

Дослідження показало, що динамічне налаштування параметрів попереднього оброблення на основі локальних особливостей зображення є ключовим фактором для досягнення високої точності в застосуванні

в медицині. У разі, коли медичні зображення можуть значно відрізнятися за якістю та характеристиками через різні умови отримання, адаптивні методи, такі як запропонований білатеральний фільтр та покращений CLAHE, виявляються більш універсальними та ефективними, якщо порівнювати з традиційними підходами.

Досягнуті результати підтверджують, що адаптивні методи попереднього оброблення значно покращують якість сегментації в медичних зображеннях, що підвищує точність діагностики та знижує ризик помилок. Зважаючи на критичне значення таких зображень для медичних рішень, запропоновані методи можуть мати важливе значення для створення більш надійних систем автоматизованої підтримки прийняття рішень.

Отже, впровадження адаптивних методів попереднього оброблення в процеси аналізу медичних зображень є перспективним напрямом, що здатне суттєво підвищити ефективність і точність медичної візуалізації. Подальші дослідження в окресленому напрямі можуть бути спрямовані на оптимізацію параметрів цих методів для різних типів медичних зображень та інтеграцію з іншими алгоритмами комп'ютерного зору для створення комплексних рішень у медичній діагностиці.

Список літератури

1. Komenchuk O. V., Mokin O. B. Analysis of Methods for Preprocessing of Panoramic Dental X-Rays for Image Segmentation Tasks. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2023. Vol. 170, No. 5. P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-41-49>
2. Towards a better understanding of annotation tools for medical imaging: a survey / M. Aljabri et al. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. P. 25877–2591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12100-1>
3. Abdi A. H., Kasaei S., Mehdizadeh M. Automatic segmentation of mandible in panoramic x-ray. *Journal of Medical Imaging*. 2015. Vol. 2, No. 4. 44003 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.jmi.2.4.044003>
4. S. S. Simon, and X. F. Joseph. Pre-Processing of Dental X-Ray Images Using Adaptive Histogram Equalization Method. *Italienisch*, Vol. 9, No. 1, P. 87–96, 2019. URL: <https://www.italienisch.nl/index.php/VerlagSauerlander/article/view/45>
5. Advances in Deep Learning-Based Medical Image Analysis / X. Liu et al. *Health Data Science*. 2021. Vol. 2021. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.34133/2021/8786793>
6. Vasuki P., Kanimozhi J., Devi M. B. A survey on image preprocessing techniques for diverse fields of medical imagery. 2017 *IEEE international conference on electrical, instrumentation and communication engineering (ICEICE)*, Karur, 27–28 April 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceice.2017.8192443>
7. Abdi A. Panoramic Dental X-rays with Segmented Mandibles. Mendeley Data. URL: <https://data.mendeley.com/datasets/hxt48yk462/2> (date of access: 17.09.2024).
8. Lin W., Lin Y. Soybean image segmentation based on multi-scale Retinex with color restoration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2284, No. 1. 12010 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2284/1/012010>
9. Prabu Shankar K. C., Prayla Shyry S. A Survey of image pre-processing techniques for medical images. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1911, No. 1. 12003 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1911/1/012003>
10. Shirai K., Sugimoto K., Kamata S.-I. Adjoint Bilateral Filter and Its Application to Optimization-based Image Processing. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. 2022. Vol. 11, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1561/116.00000046>

11. Li H., Duan X.-L. SAR Ship Image Speckle Noise Suppression Algorithm Based on Adaptive Bilateral Filter. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Vol. 2022. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/9392648> (date of access: 17.09.2024).
12. Smart Image Enhancement Using CLAHE Based on an F-Shift Transformation during Decompression / R. Fan et al. *Electronics*. 2020. Vol. 9, No. 9. 1374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091374>
13. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Computer Science Department and BIOSS Centre for Biological Signalling Studies*, University of Freiburg, Germany. 2015. P. 234–241, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
14. GitHub – huggingface/pytorch-image-models: The largest collection of PyTorch image encoders / backbones. Including train, eval, inference, export scripts, and pretrained weights – ResNet, ResNeXT, EfficientNet, NFNet, Vision Transformer (ViT), MobileNetV4, MobileNet-V3 & V2, RegNet, DPN, CSPNet, Swin Transformer, MaxViT, CoAtNet, ConvNeXt, and more. GitHub. URL: <https://github.com/huggingface/pytorch-image-models>
15. Albumentations Documentation. Albumentations: fast and flexible image augmentations. URL: <https://albumentations.ai/docs/>
16. van Beers F., Lindström A., Okafor E., Wiering M. Deep Neural Networks with Intersection over Union Loss for Binary Image Segmentation. In Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (Vol. 1 ICPRAM). 2019. P. 438–445. URL: https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/87088047/ICPRAM_2019_35.pdf
17. Li F., Jiang Q., Zhang H., Ren T., Liu S., Zou X., Xu H., Li H., Yang J., Li C., Zhang L., Gao J. Visual In-Context Prompting. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 12861–12871. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/papers/Li_Visual_In-Context_Prompting_CVPR_2024_paper.pdf

References

1. Komenchuk, O. V. & Mokin, O. B. (2023), "Analysis of Methods for Preprocessing of Panoramic Dental X-Rays for Image Segmentation Tasks", *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 170, No. 5, P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-41-49>
2. Aljabri, M. et al. (2022), "Towards a better understanding of annotation tools for medical imaging: a survey", *Multimedia Tools and Applications*. P. 25877–2591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12100-1>
3. Abdi, A. H., Kasaei, S. & Mehdizadeh, M. (2015), "Automatic segmentation of mandible in panoramic x-ray", *Journal of Medical Imaging*, Vol. 2, No. 4, 44003 p. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.jmi.2.4.044003>
4. Simon, S. S. & Joseph, X. F. (2019), "Pre-Processing of Dental X-Ray Images Using Adaptive Histogram Equalization Method", *Italianisch*, Vol. 9, No. 1, P. 87–96. available at: <https://www.italienisch.nl/index.php/VerlagSauerlander/article/view/45>
5. Liu, X. et al. (2021), "Advances in Deep Learning-Based Medical Image Analysis", *Health Data Science*, Vol. 2021, P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.34133/2021/8786793>
6. Vasuki, P., Kanimozhi, J. & Devi, M. B. (2017), "A survey on image preprocessing techniques for diverse fields of medical imagery", *2017 IEEE international conference on electrical, instrumentation and communication engineering (ICEICE)*, Karur, 27–28 April 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceice.2017.8192443>
7. Abdi, A. (2024), "Panoramic Dental X-rays With Segmented Mandibles. Mendeley Data". available at: <https://data.mendeley.com/datasets/hxt48yk462/2> (accessed: 17 September 2024).
8. Lin, W. & Lin, Y. (2022), "Soybean image segmentation based on multi-scale Retinex with color restoration", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2284, No. 1, 12010 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2284/1/012010>
9. Prabu Shankar, K. C. & Prayla Shyry, S. (2021), "A Survey of image pre-processing techniques for medical images", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1911, No. 1, 12003 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1911/1/012003>
10. Shirai, K., Sugimoto, K. & Kamata, S.-i. (2022), "Adjoint Bilateral Filter and Its Application to Optimization-based Image Processing", *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, Vol. 11, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1561/116.00000046>
11. Li, H. & Duan, X.-L. (2022), "SAR Ship Image Speckle Noise Suppression Algorithm Based on Adaptive Bilateral Filter", *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2022, P. 1–10. available at: <https://doi.org/10.1155/2022/9392648> (accessed: 17 September 2024).
12. Fan, R. et al. (2020), "Smart Image Enhancement Using CLAHE Based on an F-Shift Transformation during Decompression", *Electronics*, Vol. 9, No. 9, 1374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091374>
13. Ronneberger, O., Fischer, P. & Brox, T. (2015), "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", *Computer Science Department and BIOSS Centre for Biological Signalling Studies*, University of Freiburg, Germany. P. 234–241, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
14. "GitHub (n.d.) 'GitHub – huggingface/pytorch-image-models: The largest collection of PyTorch image encoders / backbones', GitHub". available at: <https://github.com/huggingface/pytorch-image-models>

15. "Albumentations Documentation (n.d.) Albumentations: fast and flexible image augmentations". available at: <https://albumentations.ai/docs/>
16. van Beers, F. et al. (2019), "Deep Neural Networks with Intersection over Union Loss for Binary Image Segmentation", *In Proceedings of the 8th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods (Vol. 1 ICPRAM)*, pp. 438–445. available at: https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/87088047/ICPRAM_2019_35.pdf
17. Li, F. et al. (2024), "Visual In-Context Prompting", *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, P. 12861–12871. available at: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2024/papers/Li_Visual_In-Context_Prompting_CVPR_2024_paper.pdf

Надійшла (Received) 21.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Коменчук Олег Вікторович – Вінницький національний технічний університет, аспірант, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінниця, Україна; e-mail: komenchuk77@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2786-2153>

Komenchuk Oleh – Vinnytsia National Technical University, Postgraduate Student, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia, Ukraine.

ADAPTIVE PRE-PROCESSING METHODS FOR INCREASING THE ACCURACY OF SEGMENTATION OF DENTAL X-RAY IMAGES

The **subject** of research in the article is the effectiveness of adaptive methods of preprocessing of medical images, in particular adaptive bilateral filter and modified CLAHE, in the tasks of segmentation of dental X-ray images. These methods make it possible to preserve important image details and effectively reduce noise, even in cases of high variability of images coming from different sources. The **goal** of the work is to study the impact of adaptive preprocessing methods on increasing the accuracy of segmentation of medical images and to determine the optimal combination of methods that provide the best results in segmentation tasks. The article addresses the following **tasks**: experimental comparison of adaptive preprocessing methods with traditional approaches, evaluation of segmentation efficiency using metrics such as Dice Score, Jacquard Coefficient (IoU Score), Precision and Sensitivity/Completeness (Recall)), as well as analysis of the effect of pre-processing on the quality of segmentation. The following **methods** are used: mathematical modeling, neural network training based on the U-Net model with a pre-trained timm-resnest101e encoder, image scaling to 512x512 pixels, training with a fixed learning rate of 0.001. The following **results** were obtained: the combined use of the adaptive bilateral filter and the modified CLAHE provided the highest segmentation quality indicators (Dice Score 0.9603 and Jacquard Coefficient (IoU Score) 0.94501), surpassing traditional methods. This proves the advantage of adaptive approaches in preserving the contours of objects and reducing noise. **Conclusions**: the application of adaptive preprocessing methods significantly improves the accuracy of segmentation of medical images. The combined approach including the adaptive bilateral filter and the modified CLAHE is the most effective for medical imaging tasks, which increases the accuracy of diagnosis and the reliability of automated decision support systems.

Keywords: artificial intelligence; deep learning; image segmentation; panoramic x-rays of teeth; preliminary processing; CLAHE; bilateral filter.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Коменчук О. В. Адаптивні методи попереднього оброблення для підвищення точності сегментації стоматологічних рентгеновських знімків. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.029>

Komenchuk, O. (2024), "Adaptive pre-processing methods for increasing the accuracy of segmentation of dental X-RAY images", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.029>

UDC 004.94

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.039>

A. NAFIEV, A. RODIONOV

ARCHITECTURE OF AN AUTOMATED PROGRAM COMPLEX BASED ON A MULTIPLE KERNEL SVM CLASSIFIER FOR ANALYZING MALICIOUS EXECUTABLE FILES

Subject matter. This article presents the development and architecture of an automated program complex designed to identify and analyze malicious executable files using a classifier based on a multiple kernel support vector machine (SVM). **Goal.** The aim of the work is to create an automated system that enhances the accuracy and efficiency of malware detection by combining static and dynamic analysis into a single framework capable of processing large volumes of data with optimal time expenditure. **Tasks.** To achieve this goal, tasks were carried out that included developing a program complex that automates the collection of static and dynamic data from executable files using tools like IDA Pro, IDAPython, and Drakvuf; integrating a multiple kernel SVM classifier to analyze the collected heterogeneous data; validating the system's effectiveness based on a substantial dataset containing 1,389 executable samples; and demonstrating the system's scalability and practical applicability in real-world conditions. **Methods.** The methods involved a hybrid approach that combines static analysis – extracting byte code, disassembled instructions, and control flow graphs using IDA Pro and IDAPython – with dynamic analysis, which entails monitoring real-time behavior using Drakvuf. The multiple kernel SVM classifier integrates different data representations using various kernels, allowing for both linear and nonlinear relationships to be considered in the classification process. **Results.** The results of the study show that the system achieves a high level of accuracy and completeness, as evidenced by key performance metrics such as an F-score of 0.93 and ROC AUC and PR AUC values. The automated program complex reduces the analysis time of a single file from an average of 11 minutes to approximately 5 minutes, effectively doubling the throughput compared to previous methods. This significant reduction in processing time is critically important for deployment in environments where rapid and accurate malware detection is necessary. Furthermore, the system's scalability allows for efficient processing of large data volumes, making it suitable for real-world applications. **Conclusions.** In conclusion, the automated program complex developed in this study demonstrates significant improvements in the accuracy and efficiency of malware detection. By integrating multiple kernel SVM classification with static and dynamic analysis, the system shows potential for real-time malware detection and analysis. Its scalability and practical applicability indicate that it could become an important tool in combating modern cyber threats, providing organizations with an effective means to enhance their cybersecurity.

Keywords: cybersecurity; malware detection; automated program complex; static analysis; dynamic analysis; drakvuf; IDA Pro; multiple kernel.

Introduction

Cyber threats have become increasingly sophisticated, presenting significant challenges to global security. Modern malware uses advanced techniques like code obfuscation, polymorphism, and zero-day exploits to bypass traditional security measures. This escalation necessitates the development of more robust detection systems capable of identifying threats in real time. Traditional antivirus programs, relying on signature-based detection, are inadequate against novel and rapidly changing malware variants. There is an urgent need for automated systems that can effectively analyze executable files without prior knowledge of specific threats, processing large volumes of data efficiently. Integrating machine learning into malware detection shows promise in enhancing accuracy and speed.

By combining static and dynamic analysis methods, comprehensive features can be extracted from executable files, enabling the detection of sophisticated malware that traditional methods might miss. However, challenges remain in optimizing these systems for performance and scalability, especially when dealing with the vast and diverse nature of modern malware.

Analysis of publications and problem statement

Study [1] focuses on the use of deep learning for the static analysis of complete executable files. It presents a method that automates feature extraction without the need for manual definition, allowing the system to ingest .exe files and classify them as malicious or benign. This approach employs convolutional neural networks to effectively detect complex patterns and anomalies

in binary data indicating maliciousness. However, limitations arise due to the large volumes of data required for training and vulnerability to adversarial attacks. Additionally, the significant computational resources needed restrict its practical deployment.

Another study [2] explores the application of dynamic analysis for automating the feature extraction process, relying on the behavioral characteristics of malware. It utilizes techniques that detect malicious actions based on observations of program execution, providing a deeper level of analysis. Despite its effectiveness, this approach demands substantial computational resources and time, rendering it inefficient for real-time applications where prompt detection is essential.

Recent research [3] introduces a novel approach to malware detection using graph-based features. It employs graphlet frequency distribution as feature vectors for classifying malware, demonstrating improved accuracy over traditional methods. Similarly, study [4] has explored feature selection and learning techniques for graphlet kernels, further advancing malware analysis through machine learning. These methods highlight the potential of graph-based representations in capturing complex structural patterns within malware code.

Furthermore, research [5] investigates the performance overhead of virtual machine introspection using Drakvuf for malware analysis. This study underscores the potential of virtual machine introspection in providing detailed behavioral insights while minimizing system performance degradation. Another work [6] contributes by employing graphlet analysis on complex data, which can be adapted to analyze intricate malware behaviors, offering deeper insights into malware dynamics.

Based on these challenges, the goal of this work is to develop an automated program complex that integrates static and dynamic analysis into a single system using a multiple kernel SVM classifier, thereby enhancing the accuracy and efficiency of malware detection. By creating an automated system capable of analyzing large volumes of data with optimal time expenditure, the proposed solution aims to address the limitations of previous methods. Based on our previous works [7, 8, 9, 10] that theoretically and practically substantiated the use of an SVM classifier, a program complex was developed that integrates the described approaches and algorithms.

Architecture of the program complex

The program complex developed in this work employs a multiple kernel SVM classifier structure, ensuring an effective combination of static and dynamic analysis of executable files. The program complex consists of three interconnected modules that provide data collection, processing, and analysis, forming the necessary foundation for effective malware detection. Each of these modules has its unique parameters set, directly influencing the final decision of the SVM classifier regarding the maliciousness of an executable file [11].

The **Information Extraction Module** consists of four submodules, each focused on a specific type of executable file representation:

1. **Binary:** This submodule uses IDA Pro and IDAPython to extract byte code from executable files, allowing for low-level information retrieval about the file's structure. [12, 13]

2. **Disassembly instructions:** Utilizing IDA Pro and IDAPython, this submodule extracts disassembled instructions, enabling the analysis of the program's internal commands. [14]

3. **CFG (Control Flow Graphs):** Also using IDA Pro and IDAPython, this submodule creates control flow graphs that depict the possible execution paths of the program and its structural connections. [15]

4. **Dynamic:** The use of Drakvuf for dynamic analysis allows tracking the program's execution in real-time, providing behavioral features essential for identifying malicious actions. [16, 17]

The **Information Processing Module** analyzes and transforms the data obtained from the first module, preparing it for classification. This module optimizes the data for further analysis, ensuring its standardization and normalization, which are necessary for accurate machine learning.

The **Multiple Kernel SVM Classifier Module** classifies executable files as malicious or benign. The integration of features from different sources and their analysis using various SVM kernels ensures high accuracy in malware detection, considering both static and dynamic aspects of the analysis. The architecture of the multiple kernel SVM classifier program complex can be seen in Figure 1. Experiments were conducted on a personal computer with the following specifications: Windows 10 operating system, Intel Core i5-7600 processor, 8 GB of RAM.

The dynamic analysis was performed in a Linux Windows 7 operating system, allocated 4 GB of (Ubuntu 22.04) virtual machine environment with RAM and two processor cores.

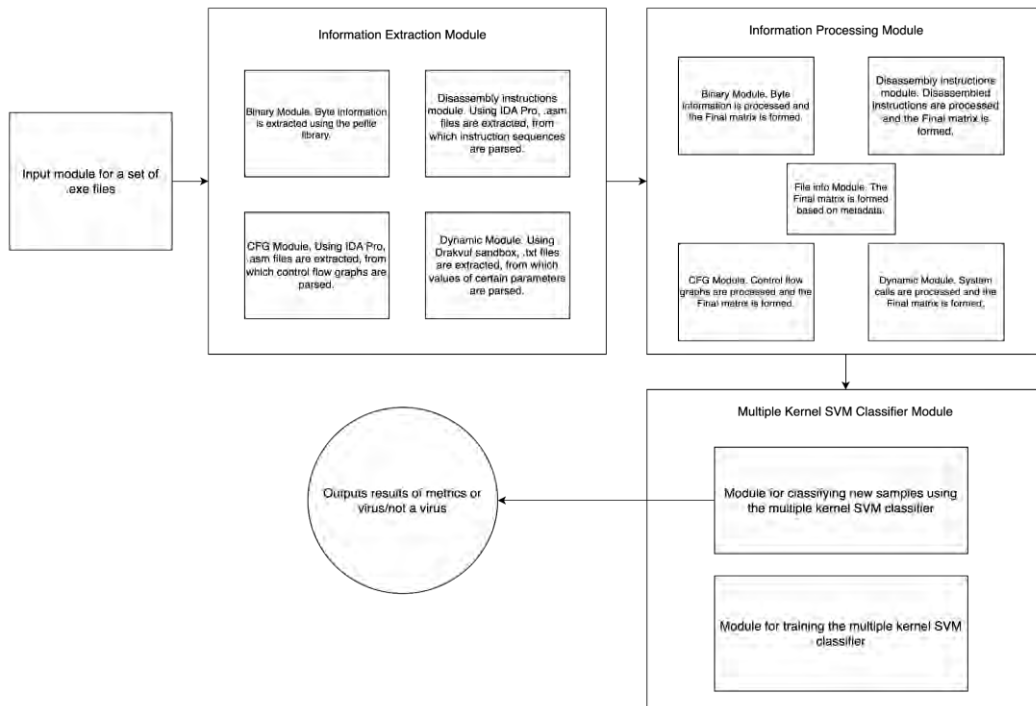


Fig. 1. Architecture of the program complex

Dataset

To validate and train the proposed architecture of the program complex, an own dataset was collected from public sources. Forming the dataset is a fundamental step in creating a machine learning model [18, 19]. For this study, a dataset comprising 1,389 executable files was assembled. This set was divided into training

and testing samples. The training sample includes 889 files, with 437 benign and 452 malicious files. The testing set includes 500 files, with 250 benign and 250 malicious files. The ratio of malicious to benign files is approximately 50/50 to achieve more balanced accuracy results for the model. Figure 2 and Figure 3 shows the distribution charts of files by type for each sample.

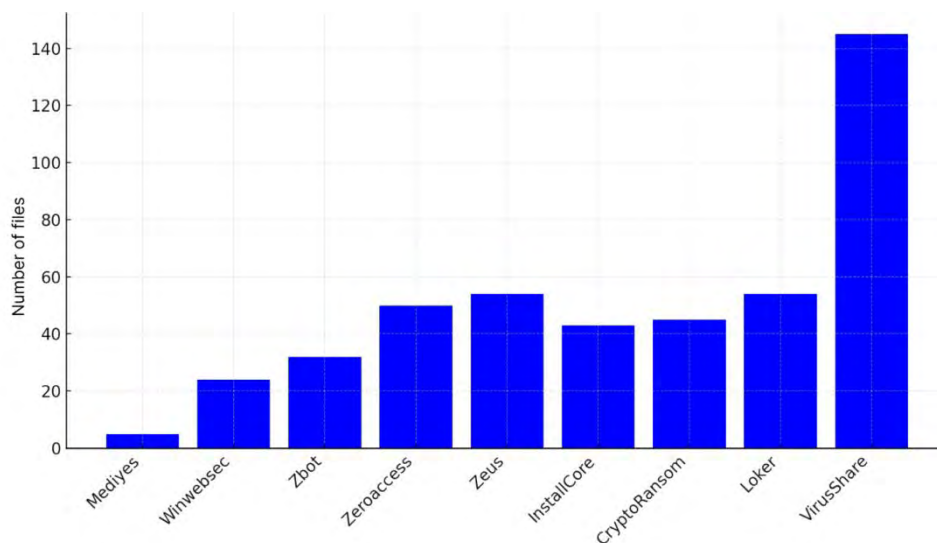


Fig. 2. Infographic of the distribution of malicious files by type in the training set

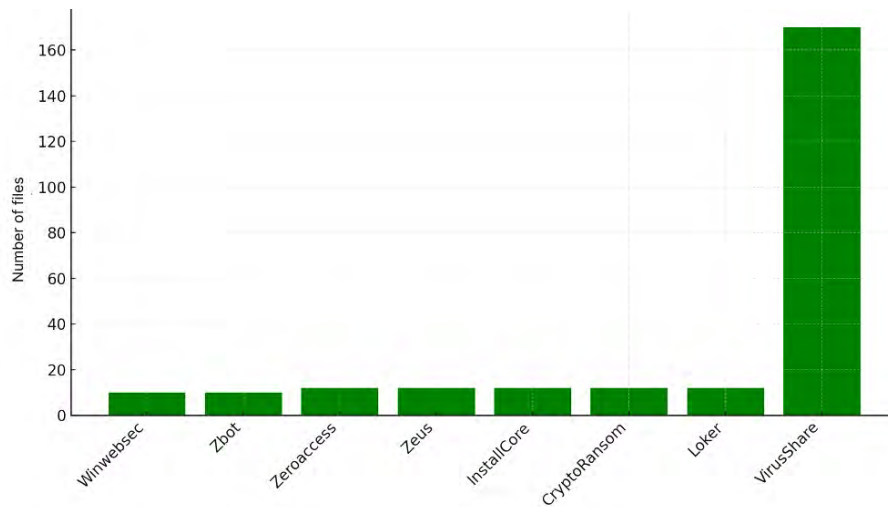


Fig. 3. Infographic of the distribution of malicious files by type in the test set

The malicious files were collected from various sites: "virusshare.com", "malicia-project.com", and "thezoo.morirt.com". The benign files were taken from the installation folders of legitimate software applications across different categories. Additionally, files were sourced from the website "exefiles.com". The "VirusShare" category represents a collection of malicious files of unknown origin, downloaded from the "virusshare.com" resource. The assembled dataset was used for training and testing the program complex, allowing its effectiveness and accuracy to be verified under conditions close to real-world scenarios.

Information extraction module

Automation of static analysis data collection

The automation of the static analysis process in our program complex is a crucial component that allows for the rapid processing of large volumes of executable files. This process is based on using IDA Pro with integrated scripting in IDAPython, which implements a complete analysis cycle for three different representations of an executable file: bytecode, disassembled instructions, and control flow graphs. The static analysis process starts with the launch of the main script "main_static.py", which automatically processes a set of executable files. For each file, the script runs IDA Pro via the command line and applies the "IDAPython_static.py" script, which performs several key tasks:

- Bytecode extraction: The script extracts all the bytecode from the executable file. This code, which is the fundamental representation of the program at the lowest level, provides critical information for further analysis of malicious patterns.

- Disassembled instructions extraction: Using the IDA Pro disassembler, the script transforms the bytecode into disassembled instructions, allowing an understanding of the program's logic and potentially malicious actions.

- Control flow Graph (CFG) generation: The script constructs control flow graphs representing all possible execution paths of the program. These graphs are essential for identifying complex behavioural patterns and dependencies between different code blocks.

All collected information from each executable file is stored as text files, enabling convenient archiving and data analysis during subsequent processing. The recorded data includes raw byte data, disassembled code, and control flow graphs as adjacency matrices. Examples of these text files can be seen in Figure 4. The required time to process one executable file ranges from 4 to 18 seconds, depending on the file itself.

Automation of dynamic analysis data collection

The dynamic analysis process starts with the execution of a control script that orchestrates a sequence of actions to run each executable file in a virtual environment. The system utilizes the Drakvuf tool to monitor system calls, interactions with the file system, registry, network requests, and other critical program behaviour parameters [20]. The control script coordinates the process, ensuring each file runs in isolation, and no processes can affect the host machine or other virtual machines. The analysis of an executable file lasts 120 seconds, during which the running program has time to exhibit its properties. After the execution, Drakvuf logs all relevant events triggered by the executable file and saves this information in text files for further analysis. It should be noted that preparation for analysis

For the other two representations, all corresponding NumPy arrays must be analyzed and the number of unique elements: disassembled instructions or system calls, must be counted. It was found that our set of executable files includes 322 unique disassembled instructions and 241 unique system call names. These unique elements form the basis of the corresponding adjacency matrices, from which transition matrices are then built, where each cell stores the probability of transitioning from one byte, instruction, or system call to another. Each transition matrix is then converted into a vector representing a separate row in the final matrix of a specific data representation. This vectorization process reduces the data complexity to a format that can be effectively used for machine learning. The final matrix's dimensionality, which is input to the SVM classifier, can be calculated using the following formula: the number of files * (the number of unique elements)².

To process text files with control flow graphs, the graphlet kernel method is used. The graphlet kernel analyzes a graph through its local structures - graphlets, which are subgraphs with a certain number of vertices. We use four-vertex graphlets, such as 4-clique, 4-chordalcycle, 4-tailedtriangle, 4-cycle, 3-star, 4-path. For each executable file, the number of occurrences of each graphlet type is counted, and this data is transformed into a feature set representing the percentage ratio of each graphlet type in the graphs of all executable file functions.

Based on the already processed data, another representation of the executable file is built – File info. Seven key metadata are used, which help gather a broader spectrum of information about the executable file and its potential malicious activity. This metadata includes: file entropy, which indicates the randomness level of the data; file packing to detect code obfuscation; file size; the number of vertices and edges in the control flow graph; and the number of static and dynamic instructions. The data processing for the five data representation types is described in detail in our previous work [10].

Multiple kernel SVM classifier module

The foundation of the software complex for analyzing malicious executable files is a multiple kernel SVM classifier capable of integrating various types of data into a single model. These representations include binary code, disassembled instructions, control flow

graph information, dynamic analysis of system calls, and file metadata. Combining this data into a single integrated machine-learning model allows the classifier to consider the diverse aspects and features of each data type during training, significantly improving the accuracy of detecting malicious files. One of the key aspects of the multiple kernel SVM classifier is its ability to combine different types of kernels, allowing the use of both linear and nonlinear relationships between the data. We use Gaussian and polynomial kernels. The multiple kernel SVM classifier module is divided into two submodules. The first submodule handles training the classifier, using the available data to learn and improve the model before applying it in real-world conditions. The input to the submodule consists of five matrices, each corresponding to its data representation. During training, these matrices are combined using kernels, allowing the model to account for various dependencies between the data. This approach ensures high accuracy in classifying malicious programs and the model's adaptability to new samples. For retraining the classifier in case of new samples, an incremental learning approach is used, where new data is added to the existing training dataset, and the model is retrained to account for these new samples. The second submodule classifies new samples using the already trained model. The process of the multiple kernel SVM classifier is detailed in our previous work [10].

Results

This section compares the results of the new model developed in this study (New model) and the old model presented in our previous work [10]. The Old model was trained on the dataset used in the previous work, which included 180 executable files, but testing was carried out on the new test set used in this study. The New model described in this work was trained on a set of 889 files and was also tested on the same test set of 500 executable files

Metrics such as F-score, Precision, Recall, ROC AUC, and PR AUC are used to reflect the models' ability to distinguish between malicious and benign files. Additionally, the throughput of each system is compared, providing insight into efficiency and speed. The metrics results can be seen in Table 1. The training dataset in the new model significantly increased compared to the previous work, likely impacting the overall accuracy improvement. The F-score,

Precision, and Recall metrics not only improved but also became more balanced, indicating the new model's ability to effectively recognize both classes (malicious and benign files). The previous model was more prone to identifying malicious files. In this study, the method of distributing types of malicious files for the test and training sets was changed. The test set includes a significant number of 'undefined' malicious files that are not classified into specific families. This gives the model a more balanced and generalized ability to recognize both malicious and benign files, making it more realistic and better at adapting to unknown threats.

In the previous work, the dynamic analysis with Drakvuf Sandbox required manually running each executable file and manually saving the results, taking about eight minutes per file. In the static analysis, files were manually opened in IDA Pro, and text files were saved, taking about three minutes per file. The new program complex with a multiple kernel SVM classifier automated the data collection processes. Dynamic analysis based on Drakvuf now takes 280 seconds per file, and static analysis with IDA Pro processes each file in 4–18 seconds. Automation made the system's throughput two times faster, making it more efficient in detecting cyber threats.

Table 1. Experiment results. The throughput metric represents the minutes required to extract information from one executable file

	F-score		Precision		Recall		roc_auc	pr_auc	throughput
	0	1	0	1	0	1			
Old model	0.8667	0.8732	0.8903	0.8517	0.8443	0.8961	0.9521	0.9542	11
New model	0.9327	0.9351	0.9502	0.9189	0.9160	0.9520	0.9716	0.9723	5

Conclusion

In this study, an automated program complex based on a multiple kernel SVM classifier was developed for analyzing malicious executable files. One of the key results is the notable increase in the system's throughput, specifically the reduction in the time required to analyze each file. Compared to the previous system, where processing each file took an average of 11 minutes, the automated program complex now requires only about 5 minutes per file. This improvement allows for the analysis to be over two times faster, optimizing time and resource utilization. Thanks to the improved data processing speed, our complex can be useful in various

real-world application conditions. In cases where a high volume of files needs to be processed, such as in corporate environments or cloud security services, the analysis process can be parallelized if sufficient computational resources are available. For example, if 100 files are received, they can be distributed across multiple instances of the program complex, maintaining an effective analysis time of 5 minutes per file. Additionally, with adequate computational power, the processing speed can be further increased, potentially reducing the time to ~3 minutes per file. By combining the automation of static and dynamic analysis, the program complex based on the multiple kernel SVM classifier reliably detects malicious programs.

References

- Raff, E., et al. (2018), "Malware Detection by Eating a Whole EXE." *Workshop on Binary Analysis Research (BAR)*.
- Santos, I., et al. (2013), "Opcode Sequences as Representation of Executables for Data-Mining-Based Unknown Malware Detection." *Information Sciences*, vol. 231, pp. 64–82.
- Tu, K., Li, J., Towsley, D. and Braines, D. (2019), "gl2vec: Learning feature representation using graphlets for directed networks", *Proceedings of the 2019 Workshop on Binary Analysis Research*. DOI: 10.1145/3341161.3342908
- Aziz, F., Ullah, A. and Shah, F. (2020), "Feature selection, F and learning for graphlet kernel", *Pattern Recognition Letters*, 140, pp. 45–51. DOI: 10.1016/j.patrec.2020.05.019
- Paakkola, S. (2020), "Assessing performance overhead of Virtual Machine Introspection and its suitability for malware analysis", *University of Turku*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/347180664.pdf>

6. Khater, I.M., Meng, F., Nabi, I.R. and Hamarneh, G. (2019), "Identification of caveolin-1 domain signatures via machine learning and graphlet analysis of single-molecule super-resolution data", *Bioinformatics*, 35(18), pp. 3468–3474. DOI: 10.1093/bioinformatics/btz951
7. Nafiev Alan, Kholodulkin Hlib, Rodionov Andrii, (2021) "Comparative analysis of machine learning methods for detecting malicious files". *Theoretical and Applied Cybersecurity*, Vol. 3 No. 1, pp 46–51.
8. Alan Nafiev, Hlib Kholodulkin, Andrii Rodionov, (2022), "Malware dynamic analysis system based on virtual machine introspection and machine learning methods", *Information Technologies and Security. Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference ITB-2022*. Issue 22: pp 53–58.
9. Nafiev Alan, Lande Dmytro, (2023), "Malware detection model based on machine learning". *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, No. 3, pp. 40–50.
10. Nafiev Alan, Rodionov Andrii, (2023), "Malware detection system based on static and dynamic analysis using machine learning", *Theoretical and Applied Cybersecurity*, Vol. 5 No. 2, pp. 97–104.
11. Rizvi, S.K.J., Aslam, W., Shahzad, M., Saleem, S. (2022), "PROUD-MAL: static analysis-based progressive framework for deep unsupervised malware classification of windows portable executable", *Complex & Intelligent Systems*, 8(1), pp. 1345–1361. DOI: 10.1007/s40747-021-00560-1
12. Faloutsos, M. (2019), "IDAPro for IoT Malware analysis? ", *Workshop on Binary Analysis Research (BAR)*, Available at: <https://escholarship.org/content/qt4rp172kk/qt4rp172kk.pdf>
13. Chen, Z., Brophy, E., Ward, T. (2021), "Malware classification using static disassembly and machine learning", *arXiv preprint arXiv:2201.07649*.
14. Talukder, S. (2020), "Tools and techniques for malware detection and analysis", arXiv preprint arXiv:2002.06819, Available at: https://www.researchgate.net/publication/339301928_Tools_and_Techniques_for_Malware_Detection_and_Analysis
15. Aziz, F., Ullah, A. and Shah, F. (2020), "Feature selection and learning for graphlet kernel", *Pattern Recognition Letters*, 140, pp. 45–51. DOI: 10.1016/j.patrec.2020.05.019
16. Singh, S. (2023), "DRAKVUF Malware Sandbox", *World Forum on Engineering and Science*, 5(1), pp. 23–30. DOI: 10.5281/zenodo.5544337
17. Dietz, C., Antzek, M., Dreo, G., Sperotto, A. (2022), "Dmef: Dynamic malware evaluation framework", *International Journal of Information Security*, 21(1), pp. 67–85. DOI: 10.1007/s10207-021-00554-1
18. Sidey-Gibbons, J.A.M. and Sidey-Gibbons, C.J. (2019), "Machine learning in medicine: a practical introduction", *BMC Medical Research Methodology*, 19(1). DOI: 10.1186/s12874-019-0681-4
19. Starink, J.A.L. (2021), "Analysis and automated detection of host-based code injection techniques in malware", *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 17(1), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s11416-020-00356-0
20. Leszczyński, M. and Stopczński, K. (2020), "A new open-source hypervisor-level malware monitoring and extraction system-current state and further challenges", *Virus Bulletin 2020*, Available at: <https://vbloghost.com/uploads/VB2020-Leszczynski-Stopczanski.pdf> (Accessed: 14 July 2024).

Надійшла (Received) 14.07.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Нафієв Алан Емінович – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Фізико-технічний інститут, аспірант, Київ, Україна; e-mail: Alan.nafiev@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8604-377X>

Родіонов Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Фізико-технічний інститут, Київ, Україна; e-mail: andrey.rodionov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7284-9458>

Nafiev Alan – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Physics and Technology, PhD student, Kyiv, Ukraine.

Rodionov Andrii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Physics and Technology, Kyiv, Ukraine.

АРХІТЕКТУРА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ БАГАТОЯДЕРНОГО SVM-КЛАСИФІКАТОРА ДЛЯ АНАЛІЗУ ШКІДЛИВИХ ВИКОНУВАНИХ ФАЙЛІВ

Тематика дослідження. У статті запропоновано розроблення та архітектуру автоматизованого програмного комплексу, призначеного для ідентифікації та аналізу шкідливих виконуваних файлів за допомогою класифікатора на основі багатоядерного навчання машини опорних векторів (SVM). **Мета** – створення автоматизованої системи, що підвищує точність і ефективність виявлення шкідливого програмного забезпечення завдяки поєднанню статичного й динамічного аналізу в єдину структуру, здатну обробляти значні обсяги даних з оптимальними витратами часу. **Завдання статті.** Для досягнення окресленої мети розроблено програмний комплекс, що автоматизує збір статичних і динамічних відомостей із виконуваних файлів за допомогою таких інструментів, як *IDA Pro*, *IDA Python* і *Drakvuf*; застосовано інтеграцію багатоядерного класифікатора SVM для аналізу зібраних різномірних даних; виконано валідацію ефективності системи на основі значного датасету, що містить 1 389 виконуваних зразків; продемонстровано масштабованість і практичну застосовність системи в реальних умовах. **Методи** передбачали гібридний підхід, що поєднує статичний аналіз – витяг байт-коду, дизасембльованих інструкцій та графів потоку керування за допомогою *IDA Pro* та *IDA Python* – з динамічним аналізом, який полягав у моніторингу поведінки в реальному часі за допомогою *Drakvuf*. Багатоядерний класифікатор SVM інтегрує різні подання даних, використовуючи різні ядра, що дає змогу брати до уваги як лінійні, так і нелінійні взаємозв'язки в процесі класифікації. **Результати дослідження** продемонстрували, що система досягає високого рівня точності та повноти, про що свідчать ключові метрики ефективності, зокрема *F*-міра 0,93 та значення *ROC AUC* і *PR AUC*. Автоматизований програмний комплекс зменшує час аналізу одного файлу з середніх 11 хв до приблизно 5 хв, що фактично подвоює пропускну здатність порівняно з попередніми методами. Це значне скорочення часу оброблення є критично важливим для впровадження в середовищах, де необхідне швидке й точне виявлення шкідливого програмного забезпечення. Крім того, масштабованість системи дає змогу ефективно обробляти значні обсяги даних, що робить її придатною для реального застосування. **Висновки.** Розроблений у межах цього дослідження автоматизований програмний комплекс демонструє значні поліпшення щодо точності та ефективності виявлення шкідливого програмного забезпечення. Інтегруючи багатоядерну класифікацію SVM зі статичним і динамічним аналізом, система виявляє потенціал для аналізу шкідливого ПЗ в реальних умовах. Її масштабованість та практична застосовність свідчать про те, що система може стати важливим інструментом у боротьбі із сучасними кіберзагрозами, надаючи організаціям ефективний засіб для підвищення їх кібербезпеки.

Ключові слова: кібербезпека; виявлення шкідливих програм; автоматизований програмний комплекс; статичний аналіз; динамічний аналіз; *Drakvuf*; *IDA Pro*; багатоядерне навчання.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Нафієв А. Е., Родіонов А. М. Архітектура автоматизованого програмного комплексу на основі багатоядерного SVM-класифікатора для аналізу шкідливих виконуваних файлів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.039>

Nafiev, A., Rodionov, A. (2024), "Architecture of an automated program complex based on a multiple kernel svm classifier for analyzing malicious executable files", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.039>

І. НЕВЛЮДОВ, М. СТАРОДУБЦЕВ, Г. МАКАРЕНКО, М. БІЛОУСОВ, С. ШИБАНОВ, Ю. РАМАЛ

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ У ЗАСОБАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У системах автоматизованого управління технологічними процесами широко використовуються технічні засоби автоматизації (датчики, перетворювачі, підсилювачі тощо), які мають технічні дефекти, що виникають під час їх виготовлення, і є однією з основних причин відмов. У роботі встановлено можливість використання законів нерівноважної термодинаміки як основи для визначення зв'язку між контрольованими параметрами технічних засобів автоматизації та параметрами відтворюваного середовища. Це дало змогу побудувати детерміновану модель процесів розвитку виробничих дефектів і зрештою визначити напрями зміни та коректування технологічних процесів виробництва засобів автоматизації. Розроблено метод реалізації гарантованого прогнозу зміни параметрів технічних засобів автоматизації на основі розв'язання рівняння еволюції із застосуванням алгоритмів оптимальної фільтрації, що і є **предметом дослідження**. **Метою роботи** є підвищення якості та надійності технічних засобів автоматизації завдяки вдосконаленню моніторингу дефектів, що виникають у виробництві приладів, функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації. У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз наявних підходів до проблеми виробничих дефектів і методів їх виявлення та визначення мети дослідження; моделювання процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану засобів автоматизації; розроблення методу ухвалення рішення на основі гарантованого прогнозування технічного стану засобів автоматизації. **Методологія** проведення роботи ґрунтується на методах термодинамічного опису кінетики процесів (під час розроблення моделі процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану) й оцінювання та прогнозування на основі алгоритмів оптимальної фільтрації (під час розроблення методу ухвалення рішення на основі гарантованого прогнозування технічного стану). **Результати роботи**: модель процесу розвитку виробничих дефектів, що викликають зміну технічного стану засобів автоматизації, і метод ухвалення рішень на основі гарантованого прогнозування технічного стану засобів автоматизації. **Висновки**. У статті встановлено можливість використання законів нерівноважної термодинаміки для визначення зв'язку між контрольованими параметрами технічних засобів автоматизації та відтворюваного середовища й побудови детермінованої термодинамічної моделі процесів розвитку виробничих дефектів. Запропоновано рівняння еволюції технічного стану засобів автоматизації, ґрунтоване на детермінованій кінетичній моделі процесів, що відбуваються в багатоконпонентному середовищі, і модель спостереження, яка бере до уваги помилки, викликані нестабільністю зовнішніх впливів, і похибки вимірювань. Запропоновано метод реалізації гарантованого прогнозу зміни параметрів засобів автоматизації на основі розв'язання рівняння еволюції з використанням алгоритмів оптимальної фільтрації, які застосовуються в розв'язанні задач оцінювання та прогнозування.

Ключові слова: засоби автоматизації; виробничі дефекти; середовище; термодинамічна модель; гарантоване прогнозування.

Вступ

Практика експлуатації засобів автоматизації (ЗА) показує, що розвиток дефектів, які виникають у процесі виготовлення приладів, є однією з основних причин відмов. Нині існує значна кількість методів і способів, що дають змогу виявляти виробничі дефекти, однак можливості цих методів обмежені [1–5]. Операції контролю та випробувань, що передбачають сучасні технологічні процеси, не можуть дати цілковитої гарантії відсутності зазначених дефектів у виробництві приладів, функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації.

У зв'язку з цим виникає завдання моніторингу технічного стану ЗА, що оцінюється за допомогою контролю параметрів, які змінюються з часом. Отримана в цьому разі інформація відтворює

розвиток виробничих дефектів. Упровадження моніторингу в структуру технологічного процесу виготовлення ЗА дає змогу підвищити ефективність виявлення виробничих дефектів, зменшити ймовірність відмов або оцінити гарантії їх відсутності, що забезпечить необхідну зміну та коректування технологічних процесів виробництва ЗА. Удосконалення методу відтворення інформації забезпечить можливість спостереження зміни технічного стану ЗА. Адекватні моделі процесу розвитку виробничих дефектів ЗА дають змогу приймати рішення про гарантоване прогнозування параметричних відмов [6–9].

Отже, моделювання та відтворення процесів розвитку виробничих дефектів ЗА для прогнозування параметричних відмов, зміни й коректування технологічних процесів виробництва приладів,

функціональних блоків і датчиків засобів автоматизації є актуальними питаннями.

1. Кінетична модель розвитку виробничих дефектів ЗА

Найважливішою характеристикою будь-якого процесу є його швидкість. Дифузія та хімічні реакції можуть бути основою визначення швидкості та, отже, опису кінетики аналізованих процесів.

Статистична фізика [10, 11] пояснює кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, які містить це середовище. Мікроскопічний стан ансамблю повністю задається канонічними змінними (X).

З макроскопічного погляду стан речовини визначається дуже обмеженою кількістю параметрів, достатніх для макроскопічної характеристики середовища. Задання цих параметрів, що вимірюються в макроскопічному дослідженні, визначає макроскопічний стан середовища. Макроскопічні параметри, зокрема об'єм ПР, є функціями канонічних змінних

$V_k(X)$, крім того, $k = 1, 2, \dots, n$, де $n \ll N$.

З огляду на макроскопічні вимірювання можна зробити лише статистичні судження про значення мікроскопічних змінних X . Отже, система, що задається макроскопічно, подається за допомогою завдання щільності ймовірності змінних $\omega(X, t)$. Ця фазова щільність ймовірності називається іноді фазовим розподілом ймовірностей, або інакше – фазовим розподілом.

Знаючи $\omega(X, t)$, можна обчислити статистичне середнє значення $V(X)$ згідно з формулою

$$V = \int_{(X)} V(X) \omega(X, t) dX, \quad (1)$$

а також середнє квадратичне відхилення:

$$\Delta V = \sqrt{(V - \bar{V})^2}, \quad (2)$$

що проявляється як флуктуація ділянки ПР, яка спостерігається.

Апарат статистичної механіки Гіббса уможливило виведення загальних співвідношень, що пов'язують середні значення, дисперсії та квадратичні кореляції узагальнених координат з їх середніми значеннями за наявності додаткових сил, що діють на ці координати. Якщо величина $V(x)$ є функцією лише координат,

її можна подати як деяку нову узагальнену координату $q(X)$. Під величиною a можна розуміти додаткову зовнішню силу, що діє в напрямку узагальненої координати q . Останнє означає, що гамільтонова функція системи має такий вигляд:

$$H(X, a) = H_0(X) + aq(X). \quad (3)$$

Справді, у цьому разі, відповідно до рівнянь Гамільтона

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\frac{\partial H_0}{\partial q} - a = A_0 - a, \quad (4)$$

тобто на систему, крім сили $A_0 = -\partial H_0 / \partial q$, діє додаткова $-a$, отримуємо

$$\overline{(q - \bar{q})^2} = -kT \frac{\partial \bar{q}}{\partial a}. \quad (5)$$

Використання основних положень теорії Гіббса дає змогу обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, які діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна зробити висновок про ієрархічний характер флуктуацій, що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів.

Швидкість процесу перетворення речовини доцільно оцінювати зміною об'єму ПР чи НР за одиницю часу.

На основі термодинамічного підходу [12, 13] запропоновано та використано рівняння для опису кінетики значної кількості реакцій, що відбуваються в багатокомпонентному середовищі:

$$dV/dt = -K \prod_i V_i^r, \quad (6)$$

де показник r – сумарний порядок реакції, він може дорівнювати нулю, бути цілим чи дробовим числом. Для адекватного опису процесів пропонується обмежуватися порядками 0, 1, 2. Константа швидкості K є одним із основних параметрів процесу, визначаючи, власне, час релаксації, і тому називається постійною релаксації.

Для нашого дослідження прийняті такі гіпотези:

- двокомпонентний склад середовища;
- залежність швидкості протікання процесу від об'єму НР ($W_0 - V$), де W_0 – початковий об'єм НР, а V – об'єм ПР;
- правило пропорційності між кількістю речовини та її концентрацією в процесі розподілу за об'ємом середовища, тоді аналізований об'єм ПР

і НР можна сприймати як концентрацію компонентів, що беруть участь у реакціях;

– припущення про те, що під час протікання реакцій термодинамічні коефіцієнти також можуть залежати від стану середовища, відтворюючи ймовірність використання рівняння Онзагера для нелінійних процесів [14, 15].

Тоді рівняння процесу можна подати в такому вигляді:

$$-dV/dt = K(W_0 - V)^r = f(V), \quad (7)$$

де показник r – порядок реакції; він може дорівнювати нулю або одиниці для лінійної та двом для нелінійної моделі. Розв'язання цього рівняння може бути використане для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму ПР.

Аналіз даних підтверджує можливість використання рівняння (7) для виділених механізмів процесів розвитку виробничих дефектів, так для:

– дифузії за умови D , пропорційному концентрації НР $(W_0 - V)$, $r = 2$; у разі постійного D можна прийняти $r = 1$ або $r = 0$;

– різних видів корозії, зважаючи на залежності енергії активації та постійні реакції від концентрації НР $r = 2$; для лінійного опису $r = 0$ або $r = 1$;

– випаровування матеріалу $r = 0$.

Для реакції нульового порядку використовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K. \quad (8)$$

Після інтегрування маємо рівняння реакції

$$V = Kt. \quad (9)$$

Зміна $\Delta V = \delta x^i \delta x^j$, що спостерігається на інтервалі спостереження δt , може бути використана для обчислення постійної релаксації K . Звідси постійна релаксації

$$K = \frac{\delta x^i \delta x^j}{\delta t}. \quad (10)$$

Для відтворення кінетики процесу для першого порядку реакції застосовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K(W_0 - V). \quad (11)$$

Після інтегрування отримуємо

$$V = W_0(1 - e^{-Kt}). \quad (12)$$

У цьому разі постійна релаксації

$$K = \frac{\ln(W)_0 - \ln(W_0 - \delta x^i \delta x^j)}{\delta t}. \quad (13)$$

За умови порядку реакції, що дорівнює двом, використовується таке диференційне рівняння:

$$dV/dt = K(W_0 - V)^2. \quad (14)$$

Після інтегрування рівняння реакції має вигляд

$$V = W_0 = \frac{W_0}{V + Kt W_0}. \quad (15)$$

У цьому разі постійна релаксації

$$K = \frac{1}{W_0 - \delta x^i \delta x^j} - \frac{1}{W_0}. \quad (16)$$

Отже, статистична фізика дає змогу пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, які містить це середовище, а макроскопічний стан ансамблю та його зміна відтворюють поведінку об'єму ПР. Використання основних положень теорії Гіббса допомагає обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, що діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна дійти висновку про ієрархічний характер флуктуацій, що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів. Знайдено еволюційне диференційне рівняння, яке дає опис реакцій, що відбуваються в спостережуваному середовищі, та використовується для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму елементарної ділянки ПР.

2. Розроблення методу прогнозування випадкового складника моделі розвитку виробничих дефектів ЗА

Для відтворення флуктуацій, з огляду на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна впроваджувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, можна скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації.

Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, що розглядається, є нелінійність еволюційних рівнянь.

Пропонується лінеаризація задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції $f(V)$ до ряду Тейлора. Як опорна траєкторія, досить близька до істинної, використовується розв'язок $V_{on}(t)$ диференціальних рівнянь для різного порядку реакцій, тоді оцінюванню та передбаченню підлягає випадкова адитивна поправка Z до детермінованого V_{on} , яке є розв'язком диференціальних рівнянь і для істинної траєкторії $V(t)$, що характеризує процес розвитку виробничих дефектів

$$V(t) = V_{on}(t) + Z(t). \quad (17)$$

Методи оцінювання поправки передбачають знання закону її розподілу. Випадкові процеси зміни параметрів ЗА вважають нормально розподіленими. Справедливість гіпотези про нормальний розподіл параметрів підтверджується багаторічними дослідженнями в теорії точності та експериментальними результатами про виробничі (технологічні) відхилення параметрів, за якими накопичено найбільший фактичний матеріал. Технологічний розкид параметрів визначає розподіл випадкового процесу дрейфу параметрів у початковий час (у перерізі $t=0$). Для монотонних процесів тип початкового розподілу в першому наближенні зберігається і для будь-яких інших часових перерізів. Використання гауссівських випадкових процесів певною мірою виправдане ще й тим, що нормальний закон розподілу містить максимум ентропії порівняно з будь-яким безперервним розподілом із тією самою дисперсією. Отже, заміна деякого розподілу на нормальний не спричинить завищення оцінок.

Остаточна форма рівняння еволюції

$$\frac{dV_{on}}{dt} + \frac{dz}{dt} = f(V_{on}) + \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (18)$$

де $f(V_{on})$ – ліва частина диференціальних рівнянь, відповідає система рівнянь

$$dV_{on}/dt = f(V_{on}), \quad (19)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (20)$$

у термінах завдання оцінювання та прогнозування перетворюється на систему рівнянь для змінних стану

$$dz_1/dt = z_2, \quad z_1 = z, \quad (21)$$

$$dz_2/dt = w(t), \quad z_2 = \frac{df(V_{on})}{dV} \Delta V, \quad (22)$$

та спостереження

$$g(t) = z_1(t) + v(t). \quad (23)$$

Тут $w(t)$ – нормальний білий шум з нульовим середнім значенням $\text{cov}\{\omega(t), \omega(\tau)\} = \Psi_{\omega}(t) \delta_D(t-\tau)$, де $\delta_D(t-\tau)$ – дельта-функція Дірака; природа процесу $w(t)$ обумовлена флуктуаціями параметрів нерівноважних середовищ, що відповідають основним положенням нерівноважної термодинаміки; $v(t)$ – процес, викликаний похибками спостереження; $z_1(t), z_2(t)$ – змінні станів. Природа процесу $w(t)$ зумовлена флуктуаціями параметрів нерівноважних середовищ, які відповідають основним положенням статистичної фізики, що дає змогу обґрунтувати поведінку ансамблю мікрочастинок, які визначають термодинамічні параметри середовища, у якому вони містяться. Як наслідок такої поведінки можна побачити теплові шуми, броунівський рух та інші подібні явища.

У розглянутій задачі шум визначає ймовірнісну розмитість меж НР, зумовлену флуктуаціями її розмірів, що мають випадковий характер. Тут так само спостерігається аналогія з реальним середовищем, що містить ансамблі мікрочастинок, розподілених за енергіями, наприклад, канонічний розподіл Гіббса для ізотермічної системи, розподіл Максвелла – Больцмана як наслідок цього розподілу для ідеального газу, що дає змогу дати "механічне" трактування.

Оскільки початкове значення $V_{on} = 0$, то в межах лінійного наближення

$$\frac{df(V_{on})}{dV} = \frac{df[V_{on}(\delta t_p)]}{V_{on}(\delta t_p)}. \quad (24)$$

Модель процесу еволюції у векторній формі

$$\dot{Z}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t), \quad (25)$$

де $Z(t)$ – вектор стану процесу, (9) матиме перехідну матрицю

$$\Phi(t_2, t_1) = \exp\left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} (t_2 - t_1) \right\} = \begin{bmatrix} 1 & t_2 - t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

де t_1, t_2 – час спостереження та час прогнозування відповідно.

Тоді алгоритм оцінювання $Z(t_2)$ за відомої оцінки $Z(t_1)$ матиме вигляд

$$Z(t_2) = \begin{bmatrix} 1 & t_2 - t_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Z(t_1), \quad (27)$$

де t_1, t_2 – час спостереження та час прогнозування відповідно.

Дисперсія поправки визначатиметься виразом

$$d_{11}(t_2) = d_{11}(t_1) + 2(t_2 - t_1)d_{12}(t_1) + (t_2 - t_1)^2 d_{22}(t_1) + \frac{(t_2 - t_1)^3}{3} \Psi_\omega, \quad (28)$$

де d_{11}, d_{12}, d_{22} – елементи коваріаційної матриці поправки, що оцінюється в момент t_1 .

Реальні оцінки поправки та коваріаційної матриці в момент t_1 , що відповідає початку процесу, можуть бути зроблені тільки після набору статистичних показників щодо відхилення реальної траєкторії від тієї, що розраховувалася на основі обраної детермінованої моделі та похідних від цих відхилень за часом. Оцінками природно обираються відповідні математичні очікування. З огляду на дискретний характер відліків часу вимірювання параметрів значення цих величин у момент t_n визначатимуться такими виразами:

$$Z_1(t_n) = M_n(\Delta V), \quad (29)$$

$$d_{11}(t_n) = M_n \left[M_n(\Delta V) - \Delta V \right]^2, \quad (30)$$

$$d_{12}(t_n) = M_n \left\{ \left[M_n(\Delta V) - \Delta V \right] \left[M_n \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) - \frac{\Delta V}{\Delta t} \right] \right\}, \quad (31)$$

$$d_{22}(t_n) = M_n \left[M_n(\Delta V / \Delta t) - \Delta V / \Delta t \right]^2. \quad (32)$$

Алгоритм оцінювання змінної Ψ_ω , що має сенс взаємно кореляційної функції

$$\Psi_\omega = K_n \left[\left(\frac{\Delta^2 V}{\Delta t^2} \right) \right] \quad (33)$$

похідної швидкості зміни поправки, може бути побудований, якщо прийняти за інтервал кореляції середнє значення інтервалів відліків часу вимірювань, а також рівність нулю математичного очікування похідної, що впливає з (32).

Вираз (33) визначає початок застосування статистики, тобто те мінімальне значення n , коли можливе оцінювання випадкового складника процесу з метою гарантованого прогнозування, очевидно $n > 4$.

Отже, оскільки у виразі (28) $t_2 - t_1 = \delta t_p$, випадкова адитивна поправка до детермінованого значення V_{on} визначатиметься виразом

$$Z(\delta t_p) = \left(\delta t_p \frac{df[V_{on}(\delta t_p)]}{V_{on}(\delta t_p)} + 1 \right) M_n(\Delta V). \quad (34)$$

Знання математичного очікування та дисперсії уможливило параметричну оцінку нормального закону розподілу випадкової величини. На основі отриманої функції щільності розподілу $\omega(z)$ можна

оцінити ймовірність P помилки прогнозування або, навпаки, інтервал Δ_z помилки за умови заданої ймовірності знаходження помилки в цьому інтервалі, використовуючи цю ймовірність як гарантію рішення про технічний стан ЗА, а також вираз

$$P(-\Delta_z < z < +\Delta_z) = \int_{-\Delta_z}^{+\Delta_z} \omega(z) dz. \quad (35)$$

Відсутність інформації про порядок реакції приводить до задачі вибору на основі спостережень. Критерієм вибору може бути максимальне значення помилок, що спостерігаються $\max_n \Delta V$. На основі інтервального оцінювання математичного очікування помилок та того, що $\max_n \Delta V$ розташовується на межі отриманого інтервалу, для однакових умов вибору для всіх моделей, що характеризуються достовірністю оцінок

$$\max_n \Delta V = M_n(\Delta V) + \frac{d_{11}(n)}{\sqrt{n}}. \quad (36)$$

Розв'язання задачі вибору передбачає обчислення максимального значення помилок для кожного порядку реакції та вибір такого порядку, що забезпечує мінімальне значення помилок, які обчислюються з використанням виразу (33).

Отже, для відтворення флуктуацій, зважаючи на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна використовувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, пропонується скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації. Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, є нелінійність еволюційних рівнянь. Запропоновано лінеаризацію задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції до ряду Тейлора. Подальше оцінювання та прогнозування випадкової адитивної поправки до детермінованого розв'язання еволюційних диференціальних рівнянь дає змогу отримати модель процесу розвитку виробничих дефектів ЗА, що бере до уваги випадкову компоненту в процесі відтворення та прийняття гарантованого рішення в прогнозуванні зміни параметрів.

Висновки

Під час відтворення процесів розвитку виробничих дефектів необхідно зважати на еволюційний та флуктуаційний характер процесів. Релаксаційний характер великомасштабних еволюційних і флуктуаційних процесів зумовлений властивостями нерівноважних станів фізичних систем. Експоненційна форма функцій зміни термодинамічних параметрів означає інваріантність у певних межах типу та змісту ЗА, умов її взаємодії із середовищем, виду та масштабу аналізованих процесів. За часом релаксації еволюційні процеси, що спостерігаються у виробництві та технічному обслуговуванні ЗА, і відповідні їм моделі мають відношення до витрачання ресурсу та зміни фізичної структури ЗА.

Статистична фізика дає змогу пояснити кінетику термодинамічних параметрів середовища на основі поведінки ансамблю частинок, що містить це середовище, а макроскопічний стан ансамблю та його зміна відтворюють поведінку об'єму ПР. Використання основних положень теорії Гіббса допомагає обчислити середні значення та флуктуації будь-яких фізичних величин, що є функціями координат, якщо відома залежність середніх значень цих величин від зовнішніх постійних сил, що діють на них. На жаль, оцінити ці сили для конкретних об'єктів неможливо. Тут тільки можна дійти висновку про ієрархічний характер флуктуацій,

що мають різний порядок часу релаксації для мікроскопічних і макроскопічних параметрів. Знайдено еволюційне диференційне рівняння, що описує реакції, які відбуваються в спостережуваному середовищі, і застосовується для знаходження детермінованої частини часової залежності об'єму елементарної ділянки ПР.

Для відтворення флуктуацій, зважаючи на неможливість повного використання результатів статистичної фізики через відсутність необхідної кількісної інформації про гамільтоніан ансамблю взаємодіючих частинок, можна впроваджувати методи статистичного аналізу результатів спостережень. Оскільки метою такого аналізу є прогнозування, пропонується скористатися теорією екстраполяції випадкових процесів, зокрема методами оптимальної фільтрації. Особливістю розв'язання задачі, пов'язаної із застосуванням оптимальної фільтрації для виділення та прогнозування випадкового складника моделі, є нелінійність еволюційних рівнянь. Запропоновано лінеаризацію задачі на основі концепції опорної траєкторії та розкладання нелінійної функції до ряду Тейлора. Подальше оцінювання та прогнозування випадкової адитивної поправки до детермінованого розв'язання еволюційних диференційних рівнянь дає змогу отримати модель процесу розвитку виробничих дефектів ЗА, що бере до уваги випадкову компоненту під час відтворення та прийняття гарантованого рішення в прогнозуванні зміни параметрів.

Список літератури

1. Nevlyudov I., Andrusevich A., Starodubcev N., Vlasenkov D. Modeling the technical resource of electronic components of automation equipment. *International independent scientific journal*. 2021. № 30. P. 61–65. URL: https://www.iis-journal.com/wp-content/uploads/2024/03/IISJ_30.pdf
2. Андрусевич А.О., Моспан Д.В., Стародубцев М.Г., Невлюдова В.В. Термодинамічна модель процесів розвитку виробничих дефектів радіоелектронних засобів. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. 2014. № 4 (28). С. 113–119. URL: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2014_4_113.pdf
3. Жарикова І.В., Невлюдов І.Ш., Андрусевич А.О., Аллахверанов Р.Ю. Методологія моделювання процесу витрачання ресурсу РЕЗ в рамках моніторингу його життєвого циклу. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 3 (39). С. 84–87. URL: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/journal/soivt/2014/3>
4. Timoshenko A.V., Perlov A.Yu., Pankratov V.A., Kazantsev A.M., Lvov K.V. Methods for Failures Forecasting of Complex Radio Electronic Systems. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. 2020. p. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9166098>
5. Заярнюк П.М. Підвищення ефективності оцінювання надійності радіоелектронної апаратури з урахуванням особливостей дрейфів параметрів і статистики відмов: дис. канд. техн. наук. Львів., 2017. 164 с. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/e4dd7f7b-56ef-4f04-b600-8a6165c393d7>
6. Nevlyudov I., Andrusevich A., Starodubtsev N., Demska N., Vzhesnievskiy M. Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle. *Innovative integrated computer systems in strategic project management: collective monograph*. 2022. ed. by I. Linde, Riga. P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.30837/mmp.2022.139>

7. Solyonyj S., Rysin A., Voropaev I., Solenaya O., & Sozdateleva M. Automated Product Life-Cycle Control System. In *Electromechanics and Robotics*. Springer, Singapore. 2022. P. 437–449. DOI: https://10.1007/978-981-16-2814-6_38
8. Невлюдов І.Ш., Филипенко О.І., Андрусевич А.О., Стародубцев М.Г. Підтримка життєвого циклу у виробничій інженерії: монографія. Криворізький коледж НАУ. 2019. 252 с. URL: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/9541>
9. Starodubtsev N.H., Fomovskiy F.V., Nevliudova V.V., Malaia Y.A., Demaskaia N.P. Matematychnе modeliuвання vyboru informatyvnykh oznak dlia analizu stanu protsesiv zhyttievoho tsykladu radioelektronnykh zasobiv. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2017. 1 (1). P. 82–89. URL: <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/issue/view/1>
10. Мартинюк В.В., Жагловська О.М. Статистична фізика. ВНТУ, 2014. 281 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c8c237c1-33aa-4b63-8336-7f38f0822b54/content>
11. Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Основи теоретичної фізики. Вища школа, 2011. 430 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000006233>
12. Ткачук Р.А., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю. Основи технології радіоелектронних апаратів. Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, 2017. 336 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21401>
13. Губар В. Г., Адаменко І. О. Фізико-теоретичні основи проектування радіоелектронної апаратури. КІП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 221 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d4d5ff7d-6f3b-4a42-ada0-7b5da2cc6a7e/content>
14. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка: 2-ге вид., випр. Техніка, 2006. 320 с. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/9ffea81b-1f6d-4de0-ace2-e731999dfabf>
15. Герасимов О.І. Фізика складних нерівноважних систем та процесів: монографія. Одеський державний екологічний університет, 2022. 187 с. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/11406/1/gerasymov_fisyka_sklad_nerivn_system_ta_protseviv-monogr_2022.pdf

References

1. Nevlyudov, I., Andrusevich, A., Starodubcev, N., Vlasenkov, D. (2021), "Modeling the technical resource of electronic components of automation equipment", *International independent scientific journal*, № 30, P. 61–65. available at: https://www.iis-journal.com/wp-content/uploads/2024/03/IISJ_30.pdf
2. Andrusevich, A.O., Mospan, D.V., Starodubcev, M.G., Nevlyudova, V.V. (2014), "Thermodynamic model of processes of development of production defects of radio electronic means" ["Termodynamichna model protsesiv rozvytku vyrobnychkh defektiv radioelektronnykh zasobiv"], *Electromechanical and energy saving systems*, № 4 (28), P. 113–119. available at: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2014_4_113.pdf
3. Zharikova, I.V., Nevlyudov, I.Sh., Andrusevich, A.O., Allakhveranov, R.U. (2014), "Methodology for modeling the process of spending the RES resource as part of monitoring its life cycle" ["Metodolohiia modeliuвання protsesu vytrachannia resursu REZ v ramkakh monitorynhu yoho zhyttievoho tsykladu"], *Weapons systems and military equipment*, № 3 (39), P. 84–87. available at: <https://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/journal/soivt/2014/3>
4. Timoshenko, A.V., Perlov, A.Yu., Pankratov, V.A., Kazantsev, A.M., Lvov, K.V. (2020), "Methods for Failures Forecasting of Complex Radio Electronic Systems", *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*. P. 1–4. available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9166098>
5. Zaiarniuk, P.M. (2017), "Improving the efficiency of assessing the reliability of electronic equipment, taking into account the features of parameter drift and failure statistics" ["Pidvyshchennia efektyvnosti otsiniuvannia nadiinosti radioelektronnoi aparatury z urakhuvanniam osoblyvostei dreifiv parametriv i statystyky vidmov"]: *dys. kand. tekhn. nauk, Lviv*, 164 p. available at: <https://ena.lpnu.ua/items/e4dd7f7b-56ef-4f04-b600-8a6165c393d7>
6. Nevlyudov, I., Andrusevich, A., Starodubtsev, N., Demaska, N., Vzhesnievskiy, M. (2022), "Choice of informative attributes for monitoring of the electronic components of automatics lifecycle", *Innovative integrated computer systems in strategic project management: collective monograph*, ed. by I. Linde, Riga, P. 139–150. DOI: <https://doi.org/10.30837/mmp.2022.139>
7. Solyonyj, S., Rysin, A., Voropaev, I., Solenaya, O., & Sozdateleva, M. (2022), "Automated Product Life-Cycle Control System", *Electromechanics and Robotics*, Springer, Singapore, P. 437–449. DOI: https://10.1007/978-981-16-2814-6_38
8. Nevlyudov, I.Sh., Fylypenko, O.I., Andrusevich, A.O., Starodubcev, M.G. (2019), "Life Cycle Support in Manufacturing Engineering" ["Pidtrymka zhyttievoho tsykladu u vyrobnychii inzhenerii"]: *monohrafiia*, Kryvorizkyi koledzh NAU, 252 p. available at: <http://openarchive.nure.ua/handle/document/9541>
9. Starodubtsev, N.H., Fomovskiy, F.V., Nevliudova, V.V., Malaia, Y.A., Demaskaia, N.P. (2017), "Mathematical modeling of the choice of informative features for the analysis of the state of the processes of the life cycle of radio-electronic

- means" ["Matematychnе modeliuвання vyboru informatyvnykh oznak dlia analizu stanu protsesiv zhyttievoho tsykladu radioelektronnykh zasobiv"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 1 (1), P. 82–89. available at: <https://itssi-journal.com/index.php/itssi/issue/view/1>
10. Martyniuk, V.V., Zhahlovska, O.M. (2014), "Statistical physics" ["Statystychna fizyka"], VNTU, 281 p. available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c8c237c1-33aa-4b63-8336-7f38f0822b54/content>
 11. Venher, Y.F., Hryban, V.M., Melnychuk, O.V. (2011), "Fundamentals of theoretical physics" ["Osnovy teoretychnoi fizyky"], Vyshcha shkola, 430 p. available at: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000006233>
 12. Tkachuk, R.A., Dozorskyi, V.H., Dediv, L.Ie., Dediv, I.Iu. (2017), "Fundamentals of the technology of electronic devices" ["Osnovy tekhnolohii radioelektronnykh aparativ"], Ternopilskiyi natsionalnyi tekhnichniy universytet im. Ivana Puliuia, 336 p. available at: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21401>
 13. Hubar, V. H., Adamenko, I. O. (2020), "Fizico-theoretical fundamentals of designing electronic equipment" ["Fizyko-teoretychni osnovy proiektuvannya radioelektronnoi aparatury"], KPI im. Ihoria Sikorskoho, 221 p. available at: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d4d5ff7d-6f3b-4a42-ada0-7b5da2cc6a7e/content>
 14. Buliandra, O.F. (2006), "Technical thermodynamics" ["Tekhnichna termodynamika"], Tekhnika, 320 p. available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/9ffea81b-1f6d-4de0-ace2-e731999dfabf>
 15. Herasymov, O.I. (2022), "Physics of complex non-equilibrium systems and processes" ["Fizyka skladnykh nerivnovazhnykh system ta protsesiv"]: *monohrafiia*, Odeskyi derzhavnyi ekolohichniy universytet, 187 p. available at: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/11406/1/gerasymov_fizyka_sklad_nerivn_system_ta_protseiv-monogr_2022.pdf

Надійшла (Received) 05.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Невлюдов 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>

Стародубцев Микола Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>

Макаренко Геннадій Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: hennadii.makarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9840-1219>

Білоусов Матвій Юрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: matvii.bilousov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-1020-500X>

Шибанов Сергій Вікторович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант, Харків, Україна; e-mail: serhii.shybanov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7143-0388>

Рамал Юсіфов – Android-розробник, NIX Solutions, Харків, Україна; e-mail: ramalyus.kyros@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3536-2087>

Nevliudov Igor – Doctor of Science (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

Starodubcev Nikolaj – PhD (Engineering Science), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics Department, Kharkiv, Ukraine.

Makarenko Hennadii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Bilousov Matvii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Shybanov Serhii – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Ramal Yusifov – Android developer, NIX Solutions, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE PROCESS OF DEVELOPMENT OF MANUFACTURING DEFECTS IN AUTOMATION MEANS

In automated process control systems, automation equipment (sensors, converters, amplifiers, etc.) with technical defects arising during their manufacture, which are one of the main causes of failures, is widely used. The paper establishes the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics as the basis for determining the relationship between the controlled parameters of automation equipment and the parameters of the displayed medium, which made it possible to build a deterministic model of the development of production defects and, ultimately, determine the directions for changing and adjusting the technological processes of production of automation equipment. A method has been developed for implementing a guaranteed forecast of changes in the parameters of automation equipment based on solving the evolution equation using optimal filtering algorithms, which is the **subject** of research. The **purpose** of the work is to improve the quality and reliability of automation equipment by improving the monitoring of defects arising in the production of instruments, functional units and sensors of automation equipment. The article solves the following **problems**: analysis of existing approaches to the problem of manufacturing defects and methods for their detection and setting a research task; modeling of the process of development of production defects causing changes in the technical condition of automation equipment; development of a decision-making method based on guaranteed prediction of the technical state of automation equipment. The **methodology** of work is based on the methods of thermodynamic description of the kinetics of processes (when developing a model of the process of development of production defects that cause a change in technical condition) and methods of assessment and forecasting based on optimal filtering algorithms (when developing a decision-making method based on guaranteed foresight of technical condition). The **results** of the work include a model of the process of development of manufacturing defects that cause a change in the technical condition of automation equipment, and a decision-making method based on a guaranteed forecast of the technical condition of automation equipment. **Conclusions.** The paper establishes the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between the controlled parameters of automation equipment and the displayed medium, and to build a deterministic thermodynamic model of the development of production defects. Disclosed is an equation of evolution of technical state of automation equipment based on a deterministic kinetic model of processes occurring in a multicomponent medium, and an observation model which takes into account errors caused by instability of external effects and measurement errors. Disclosed is a method of implementing a guaranteed forecast of change in parameters of automation equipment based on solving the evolution equation using optimal filtering algorithms, which are used to solve estimation and prediction problems.

Keywords: automation tools; manufacturing defects; environment; thermodynamic model; guaranteed prediction.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Стародубцев М. Г., Макаренко Г. С., Білоусов М. Ю., Шибанов С. В., Рамал Ю. Розроблення моделі процесу розвитку виробничих дефектів у засобах автоматизації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.048>

Nevliudov, I., Starodubcev, N., Makarenko, H., Bilousov, M., Shybanov, S., Ramal, Y. (2024), "Development of a model of the process of development of manufacturing defects in automation means", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.048>

О. Пономаренко, В. Горбачов

МЕТОД ОБФУСКАЦІЇ ПРОЄКТУ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ АГРЕГАЦІЇ

Під час виготовлення інтегральних схем існує ймовірність додавання апаратних троянів на будь-якому етапі циклу розроблення. Атаки апаратних троянів пов'язані зі зловмисними модифікаціями інтегральних схем у процесі проєктування або виготовлення, де залучаються ненадійні інструменти проєктування або компоненти. Такі модифікації можуть призвести до небажаної поведінки інтегральних схем або до появи прихованих каналів витоку інформації. Існують різні методи класифікації, виявлення та запобігання додаванню апаратних троянів. Одним із таких підходів є проєктування на основі обфускації, що ґрунтується на приховуванні функціональних та структурних властивостей проєкту, що ускладнює для зловмисника додавання троянів. **Предметом дослідження** є метод обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації. **Мета роботи** – дослідження процесу обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації. Ключова ідея полягає в тому, що етап розроблення та під'єднання монітору безпеки виконується в надійному середовищі. Отже, зловмисник не зможе отримати його функціональність та оригінальну структуру. **Актуальність роботи** полягає в тому, що зазначений підхід запобігає можливості функціонування апаратних троянів. У статті передбачається розв'язання таких **завдань**: розроблення та дослідження алгоритму обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації; реалізація подання монітору безпеки як окремої підсистеми, пов'язаної з основним проєктом; експериментальне оцінювання можливостей методу. **Результати роботи**: продемонстровано метод обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації; запропоновано монітор безпеки як окрема підсистема, що пов'язана з основним проєктом; виконано експериментальне оцінювання можливостей методу. **Висновки**. Підхід для проєктування на основі обфускації полягає в тому, що інтегральна схема модифікується, отже, приховуються функціональні та структурні властивості проєкту, що ускладнює для зловмисника додавання троянів. Обфускація на основі агрегації полягає в тому, що монітор безпеки розглядається як окрема підсистема, пов'язана з основним проєктом.

Ключові слова: апаратна безпека; обфускація проєкту електронних систем; монітор безпеки; агрегація.

Вступ

Апаратні трояни пов'язані зі зловмисними модифікаціями інтегральних схем (ІС) та вони можуть бути додані в ІС на будь-якому етапі циклу її розроблення. Такі модифікації можуть призвести до появи прихованих каналів витоку інформації або до небажаної поведінки ІС [1].

У роботі [2] стверджується, що такі етапи, як специфікація, тестування пакетів і розгортання, не вразливі до додавання апаратних троянів. Інші етапи, наприклад проєктування та виготовлення, вразливі до атак безпеки, та підтримання жорсткого контролю над циклом розроблення проєкту ІС є дуже дорогим. На цей час вже існує чимало різних методів виявлення та запобігання додаванню апаратних троянів (класифікація наведена в [3, 4]).

Обфускація проєкту є методом запобігання крадіжці інформації, зворотній інженерії, клонуванню та незаконному використанню ІС [5]. Підхід для проєктування на основі обфускації ґрунтується на приховуванні функціональних і структурних властивостей проєкту, що ускладнює для зловмисника

додавання троянів [1]. Обфускація є рішенням для захисту інтелектуальної власності електронних систем від таких атак, як зворотна інженерія та піратство [6]. За останнє десятиліття було розроблено чимало методів обфускації електронних систем.

У процесі обфускації електронних систем специфікація проєкту шифрується, змінюється опис або структура ІС та навмисно приховується її функціональність. Отже, результуюча архітектура стає неочевидною для зловмисника, що ускладнює піратство.

Ця робота присвячена дослідженню методу обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації. Розв'язуються такі завдання: розроблення та дослідження алгоритму обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації; реалізація подання монітору безпеки як окремої підсистеми, пов'язаної з основним проєктом; експериментальне оцінювання можливостей методу.

Аналіз літератури

Апаратні трояни можуть бути додані в ІС на будь-якому етапі циклу її розроблення. Атаки

апаратних троянів стали основною проблемою безпеки інтегральних схем [1]. Ці атаки пов'язані зі зловмисними модифікаціями ІС під час проектування або виготовлення в ненадійному проектному центрі чи на виробництві, де залучаються ненадійні люди, інструменти проектування або компоненти [1].

Були запропоновані методи класифікації апаратних троянів на основі різних характеристик [2]. Існує така класифікація: комбінаційні – активація троянів залежить від виникнення конкретної умови на певних внутрішніх вузлах схеми; послідовні – активація троянів залежить від появи якоїсь послідовності логічних значень у внутрішніх вузлах [2].

Деякі класифікації ґрунтуються на механізмах активації (*Trojan trigger*) та частині схеми або функціональності, на які впливає активація трояна (*Trojan payload*) [2]. Детальна класифікація апаратних троянів наведена в роботі [2].

Існують такі підходи виявлення троянів: логічне тестування та аналіз сторонніх каналів [1]. Логічне тестування полягає у розробленні тестових шаблонів для виявлення трояна. Такий підхід, найімовірніше, не зможе активувати великі трояни, що містять значну кількість тригерних входів [1].

Іншим підходом є вимірювання параметра стороннього каналу, наприклад, затримки шляху, на який можуть вплинути ненавмисні модифікації конструкції. Але ефективність аналізу сторонніх каналів обмежена великими варіаціями внутрішніх параметрів пристрою в сучасних технологіях [1]. Рішення, що поєднує в собі переваги обох підходів, може бути використано для виявлення троянських програм різних типів і розмірів [1].

Підходи, що запобігають додаванню троянів, поділяють на дві категорії: підходи на основі обфускації та підходи із заповненням макета. Підходи на основі обфускації ґрунтуються на приховуванні функціональних та структурних властивостей дизайну, що ускладнює для зловмисника додавання троянів [1].

Підходи із заповненням макета спрямовані на те, щоб позбутися можливості долучення додаткових компонентів схеми в проект способом заповнення вільного простору. Такий підхід ускладнює для зловмисника пошук місця на пристрої з метою додавання троянів [1].

Існують три типи обфускації електронних систем: пасивна обфускація, активна обфускація та обфускація на основі реконфігурованої логіки [5]. Схеми активної обфускації електронних систем можна поділити на

обфускацію на основі комбінаційної логіки і на основі скінченного автомата (СА).

- У разі пасивної обфускації електронних систем опис проекту шифрується за допомогою криптографічних методів перед тим, як передати його до ненадійних етапів циклу створення ІС. Розробник надає клієнтам правильний ключ для розшифрування проекту [5].

- Активна обфускація полягає в модифікації функціональності ІС для захисту проекту від зворотної інженерії, клонування та створення більшої кількості копій ІС, ніж було замовлено [5].

- Обфускація на основі комбінаційної логіки модифікує проект способом включення додаткових логічних вентилів [5].

- За умови обфускації на основі СА модифікується проект схеми та блокується кожна ІС за допомогою унікального шляху переходу стану [5].

- Обфускація на основі реконфігурованої логіки використовує функції реконфігурації ІС для обфускації проекту. Підхід полягає в тому, щоб зробити невеликий компонент проекту реконфігурованим в ІС. Отже, приховуються функціональні та схемні деталі на ненадійних етапах циклу розроблення [5].

Підходи до проектування захищеної системи мають бути ґрунтовані на таких чинниках:

- 1) формальних моделях безпеки, що забезпечують стійкість системи до несанкційного доступу, в умовах виникнення в її компонентах зловмисних вторгнень;

- 2) сучасних методах проектування захищеної системи, що передбачають наявність механізму безпеки як обов'язкового елемента;

- 3) теоретично обґрунтованих гарантіях безпеки системи;

- 4) застосуванні математичного моделювання для оцінювання теоретичних результатів, що стосуються безпеки систем [7], [8].

Концепція монітора безпеки (МБ) – механізму контролю доступу – є базовою в проектуванні та розробленні захищених систем [9]. МБ є концепцією контролю доступу абстрактної машини, що опосередковує всі доступи суб'єктів до об'єктів [10]. Завдяки МБ розробники можуть додати аспект безпеки в процес проектування системи замість того, щоб намагатися долучити його пізніше. Абстрактна модель МБ може застосовуватися до будь-якого типу системи, яка потребує забезпечення контролю доступу [11].

Перелічимо властивості монітора безпеки відповідно до праці [12]:

• МБ має бути таким, щоб його неможливо було обійти, зокрема зловмисник не міг обійти механізм контролю доступу й порушити політику безпеки;

• МБ має бути захищеним від несанкційного доступу, оскільки в іншому разі зловмисник може руйнувати сам механізм і таким чином порушити політику безпеки;

• МБ має піддаватися оцінюванню, тобто аналізу та тестам, повнота яких може бути гарантована. В іншому разі механізм, імовірно, матиме недоліки, через які політика безпеки не виконуватиметься;

• МБ має завжди викликатися, оскільки без цієї властивості механізм може не працювати в той момент, коли це буде потрібно, через що зловмиснику вдасться порушити політику безпеки.

У цій статті розглядається обфускація на основі реконфігурованої логіки на стадії після виготовлення ІС, а також порушується питання необхідності додавання етапу реконфігурованої логіки до циклу розроблення. Цей підхід допомагає приховати частину проекту від зловмисника, а саме функції та структуру мікросхеми доти, доки не буде запрограмована реконфігурована логіка. Обфускація

на основі реконфігурованої логіки дає змогу розрізнити розроблення та виробництво ІС. Отже, проєкт можна майже повністю розробити в надійному середовищі, за винятком деяких периферійних функцій, доданих до основних елементів.

Обфускація монітора безпеки на основі агрегації

У цій статті демонструється метод обфускації проєкту електронних систем на основі агрегації, який полягає в тому, що приховується під'єднання МБ, щоб зловмисник не міг отримати його функціональність та оригінальну структуру.

Розглянемо цей метод детальніше.

Елементи системи S об'єднуються в підсистеми S_μ , де $\mu = 1, 2, \dots, M$. Якщо підсистема S_μ є складною, тоді вона має зовнішнє середовище. Зовнішнє середовище позначається як фіктивний елемент C_0^μ або підсистема $S_{\mu 0}$ [13], [14].

Підсистема S_μ , пов'язана із зовнішнім середовищем, зображена на рис. 1.

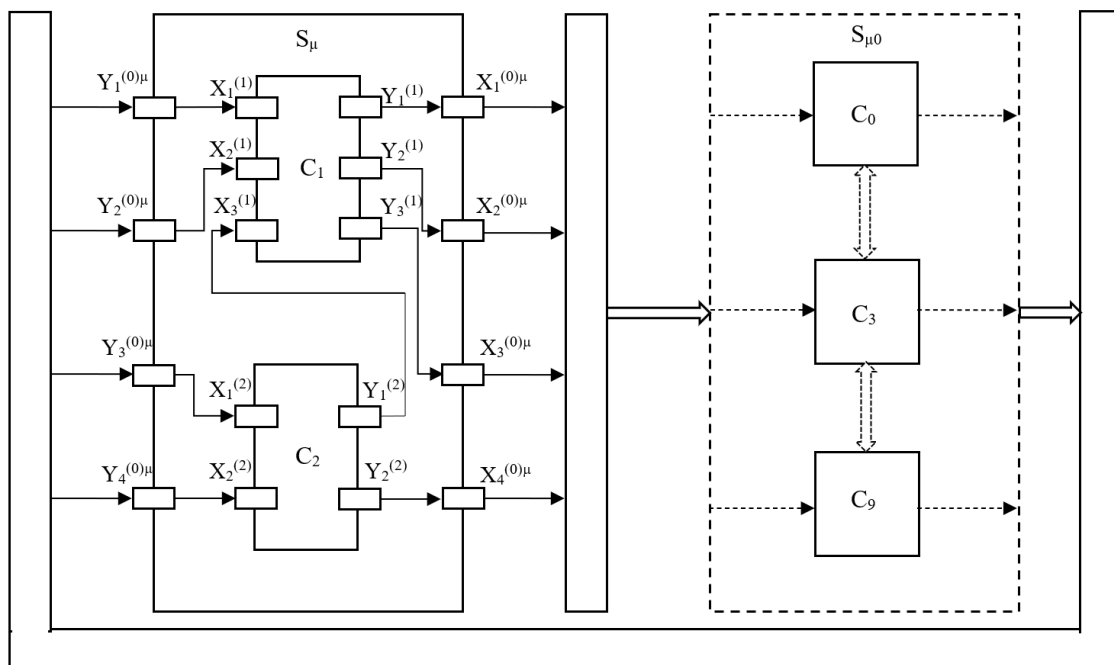


Рис. 1. Підсистема S_μ , пов'язана із зовнішнім середовищем

Взаємодія між підсистемою S_μ та зовнішнім середовищем здійснюється завдяки вхідним контактам $X_i^{(0)\mu}$ зовнішнього середовища, що з'єднуються з вихідними контактами елементів підсистеми S_μ ,

та за допомогою вихідних контактів $Y_i^{(0)\mu}$ зовнішнього середовища, які з'єднуються із вхідними контактами елементів підсистеми S_μ .

Вводиться однозначний оператор, що називається оператором сполучення елементів та поєднує вхідний контакт $X_i^{(j)}$ із вихідним контактом $Y_l^{(j)}$ [15]:

$$Y_l^{(k)} = R(X_i^{(j)}), \quad (1)$$

де область визначення на множині $\bigcup_{j=0}^N [X_i^{(j)}]_1^m$ та область значень на множині $\bigcup_{k=0}^N [Y_l^{(k)}]_1^r$.

У роботі розглядається приклад системи S , що містить 10 елементів, об'єднаних у підсистеми таким чином: $S_\mu = \{C_1, C_2\}$ і $S_{\mu 0} = \{C_0, C_3 - C_9\}$. Припустимо, що підсистема S_μ буде МБ системи та виконуватиме функції контролю доступу.

Метод обфускації МБ передбачає такі етапи: визначення фіктивних контактів на межі підсистеми S_μ і $S_{\mu 0}$ та побудова внутрішнього оператора сполучення елементів підсистеми S_μ .

Опишемо процес визначення фіктивних контактів.

Існує дві множини контактів елементів підсистеми S_μ : множина вихідних контактів $[Y_l^{(j)}]_\mu$ всіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, з'єднаних із вхідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$; множина вхідних контактів $[X_i^{(j)}]_\mu$ усіх елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$, що з'єднані з вихідними контактами елементів C_k , де $C_k \notin S_\mu$. Для всіх елементів цих множин необхідно визначити фіктивні контакти підсистеми S_μ .

Оператор Q'_μ називається оператором нумерації фіктивних контактів та визначає значення фіктивного контакту $X_i^{(0)\mu}$ залежно від вихідного контакту $Y_l^{(j)} \in [Y_l^{(j)}]_\mu$:

$$X_i^{(0)\mu} = Q'_\mu(Y_l^{(j)}). \quad (2)$$

Оператор P'_μ називається оператором нумерації фіктивних контактів та визначає значення фіктивного контакту $Y_l^{(0)\mu}$ залежно від вхідного контакту $X_i^{(j)} \in [X_i^{(j)}]_\mu$:

$$Y_l^{(0)\mu} = P'_\mu(X_i^{(j)})\sigma_X. \quad (3)$$

Наступним етапом є побудова зв'язків між елементами в підсистемі. Існує два типи зв'язків, що

необхідно розглянути. Перший тип – це внутрішні зв'язки між вхідними та вихідними контактами елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$. Другий тип – це зв'язки між вхідними та вихідними контактами елементів C_j підсистеми S_μ із вхідними та вихідними контактами елемента C_k , де $C_k \notin S_\mu$.

У першому випадку задано множини контактів $[X_i^{(j)}]_1^m$ і $[Y_l^{(j)}]_1^r$ для елементів C_j , де $C_j \in S_\mu$. Оператор сполучення елементів R_μ у цьому разі дорівнює R . У другому випадку в підсистемі S_μ мають бути контакти $X_i^{(0)\mu}$ та $Y_l^{(0)\mu}$, контакт $X_i^{(0)\mu}$ з'єднує вхідні контакти фіктивного елемента $C_0^{(\mu)}$ з вихідними контактами елементів підсистеми S_μ , контакт $Y_l^{(0)\mu}$ з'єднує вихідні контакти фіктивного елемента $C_0^{(\mu)}$ із вхідними контактами елементів підсистеми S_μ .

З допомогою оператора сполучення R_μ визначається схема сполучення елементів підсистеми S_μ :

$$Y_l^{(k)} = R_\mu(X_i^{(j)}). \quad (4)$$

Сполучення елементів підсистеми S_μ наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Сполучення елементів підсистеми S_μ

$j \backslash i$	1	2	3	4
0	1,1	1,2	1,3	2,2
1	0,1	0,2	2,1	-,
2	0,3	0,4	-,	-,

У табл. 1 елементу $C_0^{(\mu)}$ відповідає рядок 0, елементу C_1 – рядок 1, елементу C_2 – рядок 2. На перетині рядків з номерами елементів системи (j) і стовпців із номерами її вхідних контактів (i) розміщена пара чисел (k, l) , що позначає номер елемента (k) і номер його вихідного контакту (l), до якого під'єднаний контакт (i). Фіктивні контакти $X_i^{(0)\mu}$ та $Y_l^{(0)\mu}$ відповідають вхідним і вихідним контактам $C_0^{(\mu)}$ відповідно. У табл. 1 подана інформація, пов'язана з під'єднанням МБ (S_μ) і основного проєкту ($S_{\mu 0}$). Ця інформація необхідна

для програмування підсистеми S_μ на наступних етапах проектування.

У запропонованому способі проектування безпечної електронної системи обов'язковий етап розроблення механізму контролю доступу додається в цикл розроблення проекту. Завдяки обфускації приховується функціонал і структурні деталі МБ, а також забезпечуються такі властивості МБ: стає захищеним від несанкційного доступу і стає таким, щоб його неможливо було обійти.

Експериментальне оцінювання можливостей методу

Розглянемо експериментальне оцінювання потенційних переваг технології реконфігурації, що використовується для реалізації підходу обфускації МБ. Детальний опис фізичного експерименту як інструменту моделювання з метою демонстрації апаратної реалізації запропонованого методу із застосуванням платформи розроблення системи на кристалі (SoC) є достатньо специфічним і громіздким, що виводить його за межі цієї роботи. Обмежений обсяг статті не дає змогу описати докладніше експериментальне оцінювання методу. З огляду на це розглянемо основні концептуальні моменти.

У цій роботі запропонований метод обфускації проекту електронних систем для захисту проекту від різних форм атак. У межах технології часткової реконфігурації SoC основна концепція підходу має свої особливості, подані нижче.

Часткова реконфігурація – це можливість повторно конфігурувати обрані області FPGA в будь-який час після її початкової конфігурації. Проект системи на кристалі (SoC) S поділяється на дві підсистеми: S_μ , яка є МБ проекту, і $S_{\mu 0}$, що є базовим проектом системи S . Це означає, що проект загалом може бути розроблений майже повністю в ненадійному середовищі, за винятком самого RM , який розробляється повністю в довіреному середовищі. Ці функції дають змогу розробникам ближче інтегрувати аспект безпеки в процес проектування системи. Інформація з табл. 1 використовується для програмування (реконфігурації SoC) підсистеми S_μ на наступних етапах і в довіреному середовищі. Практично ми приховуємо функціонал та структурні деталі МБ.

У цій статті продемонстровано підхід до обфускації МБ на основі частково реконфігурованих проектів на FPGA. Запропонований підхід подано на архітектурі Xilinx Artix 7 FPGA сімейства ПЛІС сьомого покоління, призначеного для високопродуктивних систем. Розглянутий підхід демонструється на платі розробки Nexys 4 DDR на основі пристрою Xilinx Artix 7 XCA100T. Для проектування використовується програмне забезпечення Xilinx Vivado.

Висновки

У статті запропоновано метод обфускації проекту електронних систем на основі агрегації, який полягає в тому, що приховується під'єднання монітора безпеки, щоб зловмисник не міг отримати його функціональність та оригінальну структуру. Підхід для проектування на основі обфускації передбачає, що інтегральна схема модифікується й приховуються функціональні та структурні властивості проекту, що ускладнює для зловмисника додавання троянів.

Обфускація на основі агрегації полягає в тому, що монітор безпеки розглядається як окрема підсистема, пов'язана з основним проектом, і таблиця з'єднання елементів підсистеми містить інформацію, пов'язану з під'єднанням монітора безпеки до основного проекту. Отже, приховуються структурні деталі та функціонал монітора безпеки.

Часткова реконфігурація дає змогу повторно конфігурувати обрані області FPGA після її початкової конфігурації. Завдяки цьому проект може бути розроблений майже повністю в ненадійному середовищі, а для підсистеми, що є монітором безпеки, може бути здійснено програмування (реконфігурація SoC) на наступних етапах і в довіреному середовищі. Отже, забезпечуються властивості монітора безпеки: він має бути захищеним від несанкційного доступу та стати таким, щоб його неможливо було обійти.

Подальша робота полягає в розв'язанні таких завдань: додавання етапу створення механізму контролю доступу в цикл розроблення проекту електронної системи; теоретичний аналіз і математичне моделювання проекту електронної системи, який виконаний з використанням монітора безпеки, для оцінювання стійкості запропонованої схеми обфускації.

Список літератури

1. Hardware Trojan Attacks: Threat Analysis and Countermeasures / S. Bhunia et al. *Proceedings of the IEEE*. 2014. Vol. 102. P. 1229–1247. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2334493>
2. Chakraborty R. S., Narasimhan S., Bhunia S. Hardware Trojan: Threats and emerging solutions. *IEEE International High Level Design Validation and Test Workshop*. 2009. P. 166–171. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HLDVT.2009.5340158>
3. Li H., Liu Q., Zhang J. A survey of hardware Trojan threat and defense. *Integration*. 2016. Vol. 55. P. 426–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2016.01.004>
4. Francq J. Hardware Trojans Detection Methods. *Cassidian Cybersecurity, in TRUDEVICE*. 2013. P. 36–40.
5. Saqib F., Plusquellic J. VLSI Test and Hardware Security Background for Hardware Obfuscation. In: Forte D., Bhunia S., Tehranipoor M. *Hardware Protection through Obfuscation*. Springer. 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49019-9_2
6. Development and Evaluation of Hardware Obfuscation Benchmarks / S. Amir et al. *Journal of Hardware and Systems Security*. 2018. Vol. 2. P. 142–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41635-018-0036-3>
7. Schell R. R., Brinkley D. L. Evaluation Criteria for Trusted Systems. In: Abrams M. D., Jajodia S., Podell H. J. *Information Security: An Integrated Collection of Essays*. IEEE Computer Society Press. 1995. P. 137–159.
8. Gorbachov V., Batiaa A. K. Overview of security problems and the design of secure electronic systems. *Radiotekhnika*. 2017. Vol. 4. No. 191. P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2017.4.191.10>
9. Bishop M. *Computer Security: art and science*. Addison-Wesley. ISBN 0-201-44099-7. 2002.
10. Anderson J. Computer Security Technology Planning Study. *Technical Report ESD-TR-73-51*. 1972.
11. Securing Computer Hardware on the Base of Reference Monitor Obfuscation / V. Gorbachov et al. *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2018. P. 406–410. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632147>
12. Irvine C. E. The Reference Monitor Concept as a Unifying Principle in Computer Security Education. 1999. P. 27–37.
13. Пonomarenko O. Є., Горбачов В. О. Агрегація структурної моделі складних мережних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 1. № 71. С. 138–144. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.138>
14. Dimension Reduction for Network Systems Using Structure Model Aggregation / V. Gorbachov et al. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2020. Vol. 15. No. 1. P. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.18280/ij dne.150103>
15. Formal transformations of structural models of complex network systems / V. Gorbachov et al. *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT'2018*. Kyiv, Ukraine. 2018. P. 473–477. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409175>

References

1. Bhunia, S., Hsiao, M. S., Banga, M., Narasimhan, S. (2014), "Hardware Trojan Attacks: Threat Analysis and Countermeasures", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, P. 1229–1247. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2014.2334493>
2. Chakraborty, R. S., Narasimhan, S., Bhunia, S. (2009), "Hardware Trojan: Threats and emerging solutions", *IEEE International High Level Design Validation and Test Workshop*, P. 166–171. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HLDVT.2009.5340158>
3. Li, H., Liu, Q., Zhang, J. (2016), "A survey of hardware Trojan threat and defense", *Integration*, Vol. 55, P. 426–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2016.01.004>
4. Francq, J. (2013), "Hardware Trojans Detection Methods", *Cassidian Cybersecurity, in TRUDEVICE*, P. 36–40.
5. Saqib, F., Plusquellic, J. (2017), "VLSI Test and Hardware Security Background for Hardware Obfuscation", In: Forte, D., Bhunia, S., Tehranipoor, M. *Hardware Protection through Obfuscation*. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49019-9_2
6. Amir, S., Shakya, B., Xu, X., Jin, Y., Bhunia, S., Tehranipoor, M. M., Forte, D. (2018), "Development and Evaluation of Hardware Obfuscation Benchmarks", *Journal of Hardware and Systems Security*, Vol. 2, P. 142–161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41635-018-0036-3>
7. Schell, R. R., Brinkley, D. L. (1995), "Evaluation Criteria for Trusted Systems", In: Abrams, M. D., Jajodia, S., Podell, H. J., *Information Security: An Integrated Collection of Essays*, IEEE Computer Society Press, P. 137–159.
8. Gorbachov, V., Batiaa, A. K. (2017), "Overview of security problems and the design of secure electronic systems", *Radiotekhnika*, Vol. 4, No. 191, P. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2017.4.191.10>
9. Bishop, M. (2002), *Computer Security: art and science*, Addison-Wesley. ISBN 0-201-44099-7.
10. Anderson, J. (1972), "Computer Security Technology Planning Study", *Technical Report ESD-TR-73-51*.
11. Gorbachov, V., Batiaa, A. K., Ponomarenko, O., Kulak, E. (2018), "Securing Computer Hardware on the Base of Reference Monitor Obfuscation", *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology*, P. 406–410. DOI: [10.1109/INFOCOMMST.2018.8632147](https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632147)
12. Irvine, C. E. (1999), "The Reference Monitor Concept as a Unifying Principle in Computer Security Education", P. 27–37.
13. Ponomarenko, O., Gorbachov, V. (2023), "Aggregation of structural model of complex network systems", *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, Vol. 1 (71), P. 138–144. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.138>

14. Gorbachov, V., Sytnikov, D., Ryabov, O., Batiaa, A. K., Ponomarenko, O. (2020), "Dimension Reduction for Network Systems Using Structure Model Aggregation", *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol. 15, No. 1, P. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijdne.150103>
15. Gorbachov, V., Batiaa, A. K., Ponomarenko, O., Romanenkov, Y. (2018), "Formal transformations of structural models of complex network systems", *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies DESSERT'2018*, Kyiv, Ukraine, P. 473–477. DOI: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409175>

Надійшла (Received) 01.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Пономаренко Ольга Євгенівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: olha.ponomarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4634-6552>

Горбачов Валерій Олександрович – кандидат технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: valeriy.gorbachov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3423-2371>

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

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

AGGREGATION-BASED OBFUSCATION METHOD FOR ELECTRONIC SYSTEMS DESIGN

Hardware Trojan attacks relate to malicious modifications of integrated circuits during design or manufacturing, involving untrusted design tools or components. Such modifications can lead to undesired behavior of integrated circuits or the appearance of hidden data leakage channels. There are various methods of classification, detection and prevention of hardware Trojans insertion. One approach to prevent of Trojans insertion is an obfuscation-based design approach. This approach is based on hiding the functional and structural properties of the design, which makes it difficult for an attacker to insert Trojans. **The subject matter of research** is an aggregation-based obfuscation method for electronic systems design. **The goal of the work** is to study the process of aggregation-based obfuscation of the electronic systems design. The main idea is that the development and connection phase of the reference monitor is performed in a trusted environment. Thus, an attacker will not be able to obtain its functionality and original structure. **The relevance of the work** lies in the fact that this approach prevents the possibility of functioning of hardware Trojans. **The following tasks were solved in the work:** development and study of an aggregation-based obfuscation algorithm for electronic systems design; implementation of the reference monitor presentation as a separate subsystem associated with the main design; experimental evaluation of the possibilities of the method. **As a result of the work** the aggregation-based obfuscation method for electronic systems design was demonstrated; reference monitor was presented as a separate subsystem associated with the main design; experimental evaluation of the possibilities of the method was demonstrated. The studies allow us to **conclude:** the obfuscation-based design approach is that the integrated circuit is modified, thus, the functional and structural properties of the design are hidden, which makes it difficult for an attacker to insert Trojans. Aggregation-based obfuscation considers the reference monitor as a separate subsystem associated with the main design.

Keywords: hardware security; obfuscation of electronic systems design; reference monitor; aggregation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Пономаренко О. Є., Горбачов В. О. Метод обфускації проекту електронних систем на основі агрегації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.057>

Ponomarenko, O., Gorbachov, V. (2024), "Aggregation-based obfuscation method for electronic systems design", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.057>

О. ПОСАШКОВ, О. ЦИМБАЛ

РОЗРОБЛЕННЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ ДО НАВЧАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНИХ РІШЕНЬ

Предметом дослідження є засоби віддаленого доступу до навчального обладнання на базі *Raspberry Pi* та програмне забезпечення віддаленого робочого столу. **Мета роботи** – аналіз засобів віддаленого керування обладнанням і розроблення архітектури системи віддаленого доступу студентів до лабораторного обладнання для реалізації дистанційного навчання. У статті розв’язуються конкретні **завдання**: проаналізовано галузі, у яких застосування засобів дистанційного доступу є найбільш критичним, зокрема особливе місце посідає освітня галузь; описано наявні методи організації віддаленого доступу до навчального обладнання, виокремлено переваги й недоліки кожного з методів; обґрунтовано вибір мінікомп’ютера *Raspberry Pi* як апаратної платформи для побудови систем дистанційного доступу; запропоновано архітектуру комплексу технічних рішень на базі *Raspberry Pi* для дистанційного управління освітнім лабораторним обладнанням; описано реалізацію прикладної системи моніторингу температури та вологості з використанням розробленого підходу. **Методи дослідження** передбачають порівняльний аналіз наявних технологій дистанційного керування, прототипування та експериментальне тестування розробленої системи. Досягнуто таких **результатів**: обґрунтовано доцільність використання підходу віддаленого робочого столу та програмного забезпечення *AnyDesk* для організації доступу; розроблено систему на базі мінікомп’ютера *Raspberry Pi* для управління обладнанням та візуалізації даних; реалізовано прикладну систему моніторингу температури й вологості з використанням *Raspberry Pi* та *AnyDesk*. **Висновки.** Запропонований підхід застосування *Raspberry Pi* та програмного забезпечення віддаленого робочого столу дає змогу студентам ефективно організувати віддалений доступ до лабораторного обладнання з інженерних дисциплін під час дистанційного навчання. Це рішення поєднує простоту реалізації, взаємодію з реальним фізичним обладнанням і низьку вартість порівняно з використанням промислових ПЛК.

Ключові слова: *Raspberry Pi*; віддалений доступ; керування обладнанням; графічний інтерфейс користувача.

Вступ

У сучасному світі, що стрімко розвивається, дистанційне керування обладнанням стає все більш актуальним не тільки в освітній сфері, але й у промисловості, медицині, енергетиці та багатьох інших галузях. Ця тенденція зумовлена низкою факторів, зокрема глобалізацією, необхідністю підвищення ефективності, безпеки та гнучкості робочих процесів.

В освітньому контексті дистанційне управління навчальним лабораторним обладнанням дає змогу студентам отримати практичний досвід незалежно від їх фізичного розташування. Це особливо важливо в умовах зростання популярності дистанційного навчання та необхідності забезпечення безперервності освітнього процесу в умовах глобальних сучасних викликів, таких як пандемія COVID-19 або війни.

У зв’язку з воєнним станом в Україні, а раніше через пандемією COVID-19 виникла необхідність соціального дистанціювання. Значна кількість навчальних закладів, підприємств, організацій

та установ були вимушені швидко перейти на дистанційну роботу. У цьому разі застосовуються відомі сервіси віддаленого зв’язку, зокрема *Skype*, *Google Meet*, *Zoom*, *Microsoft Teams* тощо. Проте це не розв’язує проблеми доступу до фізичного обладнання, наприклад, для виконання практичних і лабораторних робіт студентами інженерних, медичних, фізичних, хімічних та інших спеціальностей в університеті.

Отже, актуальним завданням є розроблення гнучких та економічних рішень для віддаленого доступу студентів до лабораторного обладнання. Це дасть змогу уникнути переривання практичної підготовки в умовах дистанційного навчання, наприклад, під час карантинних обмежень.

Аналіз публікацій та постановка завдання

Наявні рішення для дистанційного доступу до лабораторного обладнання мають різні підходи, для кожного з яких властиві переваги та недоліки.

Системи віддалених робочих місць забезпечують роботу з реальним обладнанням, але для безпосереднього

керування пристроями необхідно створити додаткову систему, основу на програмованих логічних контролерах, мікроконтролерах тощо [1].

Наприклад, у роботі [2] описано систему з ПЛК та *Arduino* для керування макетами конвеєра й сортувальної машини. Користувач через *TeamViewer* під'єднується до ПК в лабораторії та запускає *GUI*-застосунок для взаємодії з обладнанням.

Однак там використаний дорогий промисловий ПЛК. Це збільшує вартість рішення порівняно з відкритими платформами на кшталт *Raspberry Pi*, які мають подібний функціонал.

У промисловому секторі віддалене управління відіграє ключову роль у концепції *Industry 4.0*. Це допомагає оптимізувати виробничі процеси, знизити витрати на технічне обслуговування обладнання та підвищити безпеку праці. Наприклад, у нафтогазовій галузі дистанційне керування дає змогу контролювати видобуток на віддалених родовищах, мінімізувати необхідність фізичної присутності персоналу в потенційно небезпечних умовах [3].

В енергетичному секторі дистанційне керування має вирішальне значення для ефективного функціонування систем розумних енергосистем. Це допомагає швидко реагувати на зміни попиту та пропозиції електроенергії, водночас забезпечувати стабільність роботи енергосистеми [4].

У медицині технології дистанційного керування відкривають нові можливості для телемедицини та робототехнічної хірургії. Лікарі можуть виконувати складні операції, експлуатуючи роботизовані системи на відстані, що особливо важливо в умовах дефіциту фахівців у віддалених регіонах [5].

Отже, метою статті є аналіз засобів віддаленого керування обладнанням та розроблення архітектури системи віддаленого доступу студентів до лабораторного обладнання для реалізації дистанційного навчання. Досягнення мети дасть змогу знизити вартість і підвищити гнучкість систем дистанційного доступу.

У статті проаналізовано наявні методи організації віддаленого доступу до навчального обладнання, визначено переваги й недоліки кожного з методів; обґрунтовано вибір мінікомп'ютера *Raspberry Pi* як апаратної платформи для побудови систем дистанційного доступу; описано розроблення комплексу технічних рішень на базі *Raspberry Pi* для дистанційного управління освітнім лабораторним обладнанням; запропоновано реалізацію прикладної системи моніторингу температури та вологості з використанням розробленого підходу.

Аналіз методів і засобів організації віддаленого доступу до навчального обладнання

Розроблення технологій дистанційного керування пройшло тривалий шлях – від простих систем дистанційного керування до складних інтерактивних платформ із застосуванням технологій штучного інтелекту та *IoT*. Історично перші спроби організувати віддалений доступ до обладнання зроблені ще впродовж 1990-х рр., але обмежена пропускна здатність мереж і відсутність відповідного програмного забезпечення значно обмежували можливості таких систем.

З розвитком технологій, особливо з появою концепції *Industry 4.0* і *IoT*, можливості дистанційного керування значно розширилися. Сучасні системи дають змогу не тільки контролювати обладнання на відстані, але й отримувати інформацію в режимі реального часу, проводити прогнозу аналітику й оптимізувати процеси за допомогою машинного навчання.

Важливо зауважити, що впровадження систем дистанційного керування потребує комплексного підходу, який бере до уваги не тільки технічні аспекти, але й людський фактор. Необхідно розробити нові методи навчання персоналу, забезпечити високий рівень кібербезпеки та розв'язати етичні питання, пов'язані з автоматизацією та дистанційним управлінням.

Існує кілька основних способів організації віддаленого доступу для керування навчальним обладнанням. Розглянемо їх.

1. Віртуальні лабораторії на основі імітаційного моделювання. Цей підхід ґрунтується на використанні програмного забезпечення для імітації роботи реального обладнання.

Наприклад, за допомогою *MATLAB* можна побудувати модель електричного ланцюга, задати параметри й дослідити його віртуальну поведінку [6].

Переваги віртуальних лабораторій:

- не потребують придбання дорогого фізичного обладнання;
 - доступні цілодобово для віддалених користувачів;
 - можливість моделювання складних процесів.
- Недоліки:
- відсутність практичних навичок роботи з реальною технікою;
 - складно коректно відтворити всі аспекти фізичних процесів.

2. Веборієнтовані дистанційні лабораторії. Тут фізичне обладнання розташоване у віддаленій лабораторії. Користувач за допомогою веббраузера може завдати параметри й проаналізувати показники з датчиків після проведення реального експерименту [7].

Наприклад, задати склад речовин та умови для проведення хімічної реакції. Або обрати режим роботи й параметри сигналів для електричного ланцюга. Такі системи використовують, наприклад, віртуальні лабораторії НГУУ "КПІ" та університету Нортвестерн, США.

Переваги веборієнтованих лабораторій:

- доступ до реального обладнання;
- можливість віддаленої спільної роботи користувачів;
- гнучке програмування експериментів.

Недоліки:

- потребують подвійного комплексу обладнання;
- складне розроблення серверної частини та інтерфейсів;
- потребують високошвидкісне стабільне інтернет-з'єднання.

3. Системи віддаленого робочого столу. Цей підхід передбачає використання спеціального ПЗ для віддаленого з'єднання з робочим столом комп'ютера, до якого під'єднане навчальне обладнання.

Прикладами таких систем є:

- система дистанційного доступу до лабораторних комплексів КПІ на базі програмного забезпечення *UltraVNC*;

- рішення компанії *ADLE Laboratory* для віддаленого управління фізичними моделями через інтерфейс *LabView*;

- система віртуальних лабораторних практикумів Вінницького національного технічного університету на платформі *AnyDesk*.

Переваги підходу віддаленого робочого столу:

- простота організації з'єднання через наявне ПЗ;
- робота з реальним обладнанням;
- не потребує додаткових комплектів устаткування.

Недоліки:

- залежність від якості мережного з'єднання;
- питання безпеки даних та доступу.

Отже, підхід із застосуванням технологій віддаленого робочого столу є оптимальним рішенням для організації доступу студентів до лабораторного обладнання.

Основними елементами такої системи є [8]:

- апаратно-програмний комплекс керування обладнанням;
- програмне забезпечення організації віддаленого робочого столу;
- комп'ютер у лабораторії, до якого все під'єднано;
- комп'ютер користувача з клієнтським ПЗ та доступом до мережі Інтернет.

Серед програмних рішень для віддаленого доступу найбільш поширеними є *VNC (Virtual Network Computing)* та *RDP (Remote Desktop Protocol)*. Вони дають змогу під'єднатися до робочого столу віддаленого комп'ютера та керувати ним.

Переваги цих технологій:

- кросплатформність: *VNC*- і *RDP*-клієнти та сервери є для всіх поширених ОС (*Windows, Linux, Android, iOS*);
- можливість передачі відео та звуку в режимі реального часу;
- невисокі системні вимоги та швидке з'єднання;
- підтримка автентифікації та шифрування трафіку.

Недоліки *VNC* та *RDP*:

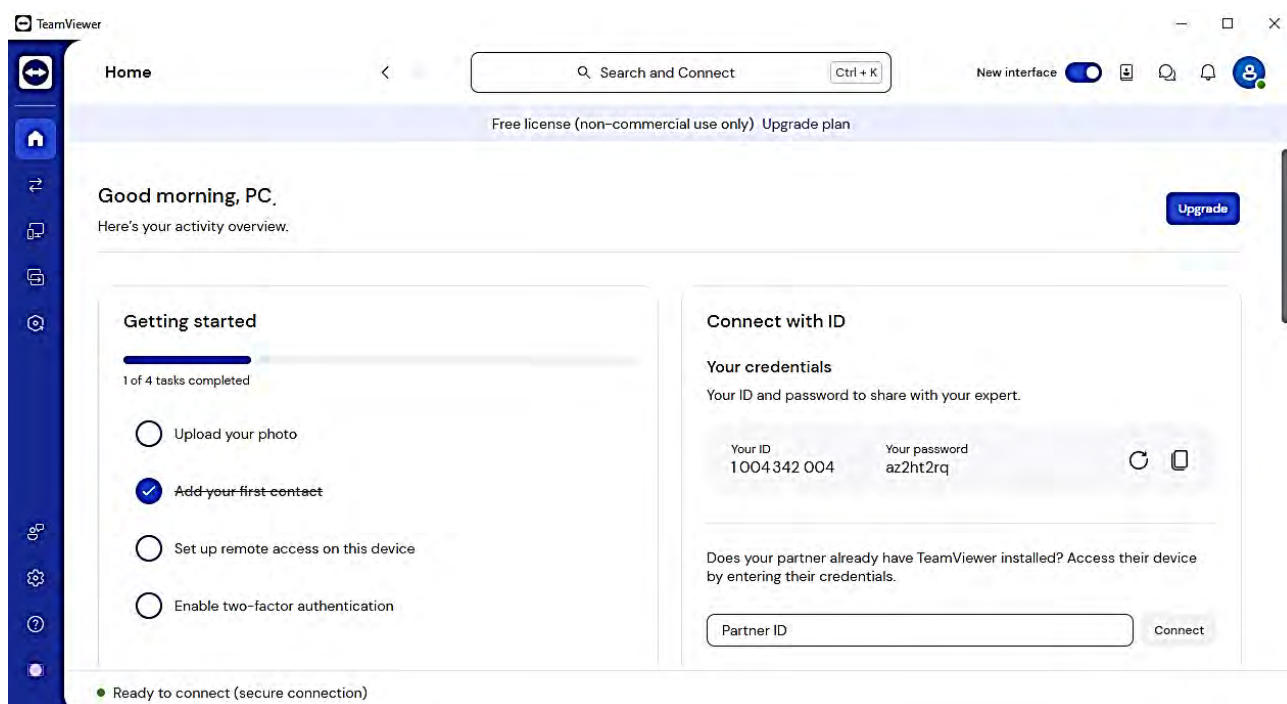
- складніше налаштування, ніж у спеціалізованих програмах на кшталт *TeamViewer*;
- для якісного відео потрібне швидке з'єднання та ресурси;
- *RDP* потребує активації на сервері, унеможливує багатокористувацький режим.

Альтернативою *VNC* та *RDP* є спеціалізовані хмарні сервіси віддаленого доступу. Вони пропонують такі переваги:

- єдиний ID та пароль для швидкого з'єднання;
- вбудовані функції передачі файлів, відеоконференцій, чату;
- можливість одночасних під'єднань від декількох користувачів;
- розширені функції безпеки та контролю доступу;
- не вимагають налаштування мережних параметрів чи маршрутизатора.

Розглянемо популярні програмні рішення для організації віддаленого доступу до робочого столу комп'ютерів.

1. *TeamViewer*. Кросплатформний застосунок, що дає змогу віддалено під'єднуватися до ПК та серверів, передавати файли, організувати відеоконференції. За допомогою *TeamViewer* можна отримати повний контроль над віддаленим комп'ютером (рис. 1).

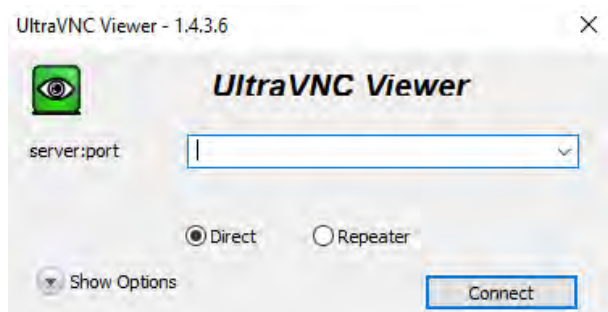
Рис. 1. Вікно *TeamViewer*

Основні функції та можливості *TeamViewer*:

- віддалене управління робочим столом;
- передача файлів будь-якого розміру;
- відео та голосовий зв'язок у режимі реального часу;
- організація онлайн-зустрічей та вебінарів.

Отже, *TeamViewer* надає широкий спектр функцій для віддаленої роботи й може застосовуватися, зокрема, для організації доступу до лабораторного обладнання.

2. *UltraVNC*. Безкоштовне рішення з відкритим вихідним кодом для віддаленого адміністрування та доступу до робочого столу ОС *Windows*. *UltraVNC* використовує протокол VNC, що допомагає передавати відео та аудіо в режимі реального часу (рис. 2).

Рис. 2. Вікно *UltraVNC*

Особливості *UltraVNC*:

- підтримка якісної передачі екрана з можливістю масштабування;
- автентифікація користувачів і шифрування трафіку;
- дзеркальний режим – одночасне управління з двох комп'ютерів;
- плагіни для розширення функціональності;
- керування відеопотоком з вебкамер.

UltraVNC широко застосовується для надання технічної підтримки віддаленим користувачам та організації дистанційного навчання, зокрема доступу до лабораторних установок.

3. *AnyDesk*. Швидкісний кросплатформний застосунок для віддаленого адміністрування та підтримки, що останнім часом набуває все більшої популярності (рис. 3).

Ключові характеристики *AnyDesk*:

- висока швидкість передачі зображення зі стисненням;
- мінімальне споживання інтернет-трафіку;
- вбудована система адресної книги клієнтів;
- передача файлів і текстових повідомлень;
- захищене з'єднання за допомогою *TLS 1.2* та *RSA 2048*.

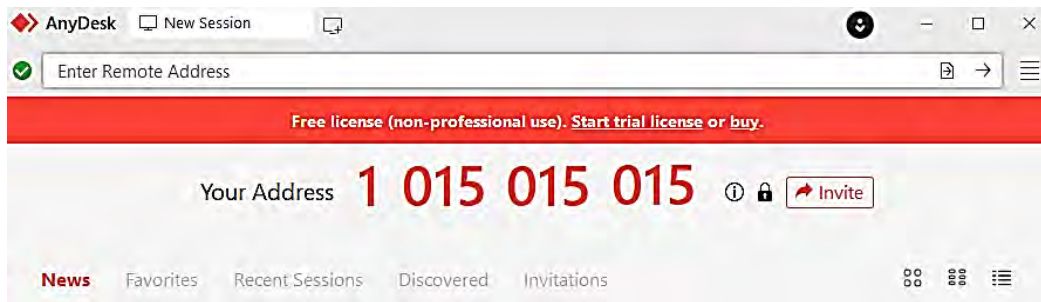


Рис. 3. Вікно AnyDesk

Основні напрями застосування AnyDesk:

- технічна підтримка та розв’язання проблем комп’ютерів і мереж користувачів;
- адміністрування та моніторинг серверів і робочих станцій;
- віддалена співпраця та обмін даними між пристроями.

Застосунок AnyDesk ефективний для організації віддаленого доступу до фізичного обладнання, зокрема навчального.

4. *Ammyu Admin*. Пропріетарне рішення для віддаленого адміністрування та доступу до робочого столу, що використовує власний протокол передачі інформації (рис. 4).

Ключові характеристики *Ammyu Admin*:

- максимальна швидкість та якість передачі зображення та звуку;
- високий рівень стиснення трафіку – до 90%;
- можливість одночасних під’єднань кількох користувачів;
- функції чату та аудіо- та відеозв’язку;
- підтримка різних пристроїв введення на віддаленому комп’ютері;

Таблиця 1. Порівняльна характеристика розглянутих рішень

Характеристика / ПЗ	<i>TeamViewer</i>	<i>UltraVNC</i>	<i>AnyDesk</i>	<i>Ammyu Admin</i>
Швидкість роботи	висока	середня	дуже висока	надвисока
Якість зображення	висока	середня	висока	надвисока
Багатоплатформність	так	ні	так	так
Вартість	безкоштовна та платна версії	безкоштовна	безкоштовна та платна версії	безкоштовна та платна версії
Безпека	висока	середня	висока	середня
Підтримка	платна	спільнота	безкоштовна і платна	платна

Для навчальних закладів краще підходить *TeamViewer* або *AnyDesk* завдяки простоті використання, кросплатформності та наявності безкоштовних версій.

- низькі системні вимоги.



Рис. 4. Вікно Ammyu Admin

Ammyu Admin широко застосовується ІТ-фахівцями та службами техпідтримки для віддаленого адміністрування, налаштування та пошуку несправностей комп’ютерів і мереж користувачів.

Також це ПЗ можна використовувати для надання віддаленого доступу до фізичного обладнання, приладів та установок, зокрема в навчальних цілях.

Отже, залежно від конкретних вимог будь-яке з розглянутих рішень може бути ефективним для організації віддаленого доступу до обладнання та установок.

Опис апаратно-програмного комплексу дистанційного керування обладнанням

Щодо апаратно-програмного комплексу керування обладнанням можливе кілька основних варіантів реалізації.

1. Використання програмованого логічного контролера (ПЛК) – пристрою на базі мікропроцесора для керування виробничим устаткуванням. Він має модулі введення / виведення для зв'язку з датчиками та виконавчими пристроями, а також засоби під'єднання до мережі та інших систем [9].

ПЛК містить такі ключові компоненти:

- центральний процесор (*CPU*);
- пам'ять для зберігання програм і даних;
- модулі введення / виведення для під'єднання датчиків і виконавчих механізмів;
- комунікаційні інтерфейси для зв'язку з іншими пристроями та системами [10].

Програмування ПЛК зазвичай виконується за допомогою спеціалізованих мов, визначених стандартом *IEC 61131-3*, таких як:

- структурна схема (*LD*);
- функціональна блок-схема (*FBD*);
- структурований текст (*ST*);
- список інструкцій (*IL*);
- послідовна функціональна схема (*SFC*).

Основною перевагою ПЛК є їх значна надійність у промислових обставинах. ПЛК призначені для роботи в жорстких умовах з високим рівнем електромагнітних перешкод, вібрації та екстремальних температур. Вони також мають вбудовані функції діагностики та захисту від несправностей [11].

Однак ПЛК досить дорогі й мають фіксований набір функцій. Вартість ПЛК може варіюватися від декількох сотень до десятків тисяч доларів залежно від потужності та функціональності. Крім того, розширення функціональності ПЛК часто потребує придбання додаткових модулів або навіть заміни всього пристрою.

Незважаючи на ці обмеження, ПЛК залишаються популярним вибором для багатьох промислових застосувань завдяки своїй надійності, довговічності та спеціалізованому характеру. Вони широко використовуються в таких галузях, як автомобільна, нафтогазова промисловість, харчова та багато інших [12].

2. Використання платформи *Arduino* чи мікрокомп'ютера *Raspberry Pi* з модулями введення / виведення. *Arduino* – популярна *open-source*-платформа для побудови систем автоматичної та робототехніки. Вона проста в застосуванні та не дорога. *Raspberry Pi* – це фактично повноцінний мініатюрний комп'ютер, на якому може виконуватися будь-яке програмне забезпечення під управлінням ОС *Linux* [13].

Такі рішення надають високу гнучкість та є зручними для навчального процесу.

Для реалізації системи віддаленого доступу до навчального обладнання найбільш перспективним є використання саме платформ на кшталт *Arduino* чи *Raspberry Pi*.

Їх переваги порівняно з ПЛК [14]:

- низька вартість; *Arduino Uno* коштує менше ніж 10\$, *Raspberry Pi* – від 35\$ за модель 3B+, а вартість промислових ПЛК починається від сотень доларів;
- відкритість і гнучкість; на відміну від ПЛК, для *Arduino* чи *Raspberry Pi* можна розробляти будь-які алгоритми керування, реалізовувати збір і оброблення показників із датчиків;
- спрощене прототипування систем автоматичної платформи *Arduino* і *Raspberry Pi* дають змогу швидко й дешево створювати дослідні зразки таких систем;
- зручність для навчання; програмування мікроконтролерів і мінікомп'ютерів розвиває цінні практичні навички з електроніки, мережних технологій, розроблення ПЗ.

Отже, застосування *Arduino* або *Raspberry Pi* є оптимальним рішенням для побудови апаратно-програмного комплексу керування обладнанням у складі системи його віддаленого доступу.

Докладніше розглянемо можливості платформи *Raspberry Pi* для побудови систем керування обладнанням.

Raspberry Pi – це одноплатний мініатюрний комп'ютер розміром з кредитну картку. Він містить всі ключові компоненти ПК:

- процесор *ARM 1,2–1,5 ГГц* (моделі 3B/4B);
- від 1 до 8 Гб оперативної пам'яті;
- слот для мікро-SD-карти як накопичувача;
- інтерфейси: *USB, Ethernet, WiFi, Bluetooth, HDMI* тощо;
- 40 *GPIO* пінів для під'єднання зовнішніх пристроїв.

На *Raspberry Pi* може працювати операційна система *Linux* та виконуватися програми мовами *Python, Java, C/C++, JavaScript* та багатьма іншими [15].

Тому ця платформа дає змогу реалізувати:

- збір і оброблення інформації з різноманітних датчиків;
- генерацію керуючих сигналів та управління виконавчими пристроями;
- візуалізацію процесів і створення інтерфейсів користувача;

– мережну взаємодію, передачу даних та медіапотоків;

– інтеграцію в хмарні та мобільні застосунки.

Отже, *Raspberry Pi* є повноцінним комп'ютером у мініатюрному виконанні за дуже привабливою ціною (від 35\$ за модель 3B+) [16].

Ця платформа активно використовується для створення Інтернету речей, розумних пристроїв, мобільних роботів тощо. Зокрема, на базі *Raspberry Pi* реалізовано такі цікаві проекти:

– метеостанція з відтворенням показників у реальному часі;

– безпілотний автомобіль із функцією автономної навігації;

– портативний ігровий *emulator* класичних відеоігор;

– музичний центр із підтримкою голосового управління;

– система розпізнавання образів на *Python* з використанням *OpenCV*.

З огляду на гнучкі можливості та активну підтримку з боку розробників *open-source*-спільноти, *Raspberry Pi* є ідеальною платформою для побудови системи віддаленого доступу до навчального обладнання. Це дасть змогу ефективно та з мінімальними витратами реалізувати необхідні функції збору інформації, керування пристроями, візуалізації та зв'язку.

Крім вбудованої периферії, *Raspberry Pi* уможливорює під'єднання зовнішніх модулів для розширення функціональності. Зокрема актуальними є такі додаткові пристрої:

– *GPIO Extension Board* – розширює кількість портів введення / виведення загального призначення для під'єднання різноманітних датчиків і виконавчих механізмів;

– *Sense HAT* – містить датчики температури, вологості, атмосферного тиску; акселерометр, магнітометр, гіроскоп; світлодіодну матрицю 8x8, може застосовуватися в освітніх проектах з метеорології, астрономії, геології та інших галузей наук;

– *Camera Module* – дає змогу під'єднати цифрову камеру високої чіткості для захоплення фото та відео, корисно в задачах комп'ютерного зору та наочної візуалізації даних;

– *LCD Display* – алфавітно-цифровий екран для текстового відтворення інформації та створення інтерфейсу користувача.

Застосування таких додаткових модулів значно розширює функціонал і сфери використання *Raspberry Pi*, зокрема в навчальних та наукових цілях.

Отже, аналіз наявних методів організації віддаленого доступу до лабораторного обладнання доводить, що найбільш перспективним є підхід на основі технологій віддаленого робочого столу [17].

Ключовими технологіями для побудови такої системи визначено:

– *Raspberry Pi* – апаратну платформу для збору даних, керування обладнанням та візуалізації;

– програмне забезпечення класу "віддалений робочий стіл" (*TeamViewer*, *TightVNC*, *UltraVNC*) для організації доступу [18].

Застосування зазначених технологій дасть змогу ефективно та з мінімальними витратами створити систему віддаленого доступу студентів до лабораторного обладнання. Це особливо актуально в умовах карантинних обмежень та поширення дистанційних форм навчання.

Розроблення системи віддаленого моніторингу температури та вологості

Система моніторингу температури та вологості призначена для безперервного контролю мікроклімату у виробничих цехах, складських приміщеннях, серверних залах та інших критично важливих об'єктах (рис. 5). Підтримання необхідних діапазонів цих параметрів є вкрай важливим для забезпечення належного зберігання вантажів, роботи обладнання та комфортних умов праці персоналу.

Ефективний контроль температури та вологості відіграє ключову роль у багатьох галузях промисловості та бізнесу. Наприклад, у харчовій сфері точний контроль цих параметрів необхідний для запобігання розмноженню бактерій і забезпечення безпеки продукції. У фармацевтичній промисловості стабільні умови зберігання мають вирішальне значення для захисту ефективності ліків. У текстильній галузі контроль вологості необхідний для дотримання якості тканини та запобігання виникненню статичної електрики.

Для серверних кімнат контроль температури та вологості є особливо важливим. Перегрів може призвести до збоїв у роботі обладнання та втрати показників, тоді як надмірна вологість може спричинити корозію компонентів. Оптимальна температура для серверних приміщень зазвичай коливається в межах 18–27°C, а відносна вологість – від 45 до 55%.

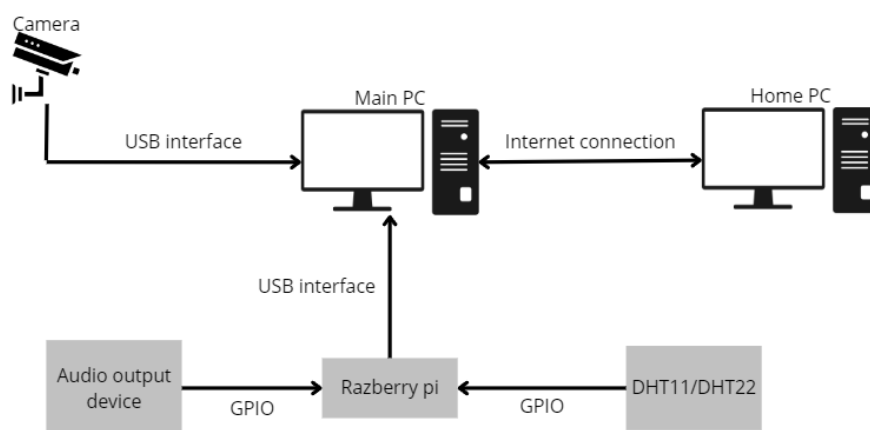


Рис. 5. Архітектура системи віддаленого моніторингу

На складах підтримання правильного мікроклімату допомагає запобігти псуванню товарів (наприклад, електроніка, деревина, папір або продукти харчування), особливо чутливих до змін температури та вологості. Крім того, стабільні умови зберігання дають змогу значно подовжити термін придатності багатьох продуктів.

Для персоналу комфортні умови праці не лише підвищують продуктивність, але й знижують ризик захворювань, пов'язаних з роботою в несприятливих обставинах. Відповідно до досліджень оптимальна температура для роботи в офісі становить 20–26°C, а відносна вологість – від 30 до 60%.

Сучасні системи моніторингу температури та вологості часто інтегровані із системами автоматизації будівель (BMS), що дає змогу не тільки контролювати, а й автоматично регулювати параметри мікроклімату. Це забезпечує енергоефективність та оптимальне використання ресурсів.

Центральним вузлом системи є одноплатний комп'ютер *Raspberry Pi 3 Model B+*. Він зчитує показники температури та відносної вологості повітря з під'єданого високоточного цифрового датчика *DHT22* в режимі реального часу. Показники з датчика надходять на *Raspberry Pi* через виводи загального призначення *GPIO*. Архітектура системи віддаленого моніторингу показана на рис. 5.

Зібрана інформація про поточний стан мікроклімату передається та безперервно оновлюється на основному персональному комп'ютері, розташованому в тій самій локальній мережі. Зв'язок між *Raspberry Pi* та ПК здійснюється за допомогою *USB*-інтерфейсу.

На основному ПК працює спеціалізоване програмне забезпечення, що візуалізує результати

моніторингу в зручному для користувача форматі – у вигляді графіків, діаграм, таблиць у режимі реального часу. Тут також реалізована функція задання порогових значень температури та вологості відповідно до норм для кожного конкретного об'єкта.

Якщо параметри мікроклімату відхиляються від заданих меж у той чи інший бік, система автоматично генерує звуковий сигнал-сирену для оперативного сповіщення обслуговувального персоналу. Для цього на одному з *GPIO*-виводів *Raspberry Pi* під'єднаний активний п'єзодинамік. Його гучний різкий звук миттєво привертає увагу працівників до критичної ситуації.

Крім локального моніторингу, система також забезпечує віддалений доступ до даних через інтернет за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення *TeamViewer* або *AnyDesk*. Це дає змогу авторизованим користувачам отримувати актуальну інформацію про стан об'єкта та контролювати його мікроклімат із будь-якої точки світу.

Структура системи:

- *Raspberry Pi 3 Model B+* – центральний вузол для збору даних;
- датчик температури та вологості *DHT22* – під'єднаний до *GPIO Raspberry Pi*;
- активний п'єзодинамік – для звукового сигналу, під'єднаний до *GPIO*;
- основний ПК в лабораторії – отримує інформацію через *USB*-з'єднання;
- домашній ПК – для віддаленого доступу через *TeamViewer* або *VNC*.

Код на *Python* для реалізації системи моніторингу з використанням бібліотеки *Adafruit_DHT*:

```

import Adafruit_DHT
import time
import RPi.GPIO as GPIO

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(18, GPIO.OUT)

sensor = Adafruit_DHT.DHT22
pin = 4

temp_max = 30 # °C
temp_min = 10 # °C
hum_max = 70 # %
hum_min = 30 # %

while True:
    humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(sensor, pin)
    if humidity is not None and temperature is not None:
        print(f"Temperature: {temperature:.1f}C, Humidity: {humidity:.1f}%")

        if temperature > temp_max or temperature < temp_min or humidity > hum_max or humidity < hum_min:
            GPIO.output(18, True)
        else:
            GPIO.output(18, False)

    else:
        print("Failed to get reading. Try again!")

    time.sleep(10)

```

Пояснення коду:

- імпортуються необхідні бібліотеки;
- ініціалізується *GPIO Raspberry Pi* та призначається вивід 18 для керування сиреною;
- налаштовується датчик *DHT22* на *GPIO 4*;
- задаються допустимі межі температури та вологості;
- у нескінченному циклі зчитуються показники з датчика за допомогою *read_retry()*;
- якщо показники успішно зчитані, вони виводяться на екран і перевіряються з пороговими значеннями;
- у разі виходу температури чи вологості за межі вмикається сирена на виводі 18 *GPIO*;
- якщо параметри в нормі, сирена вимикається;
- цикл повторюється кожні 10 секунд для постійного моніторингу.

Отже, описана система на базі *Raspberry Pi* здатна постійно відстежувати температуру та вологість повітря, передавати інформацію на сервер для аналізу

та візуалізації, а також сповіщати про критичні ситуації звуковим сигналом. Система може бути корисною для промислових підприємств, складів і будь-яких об'єктів, де необхідний контроль мікроклімату.

Висновки

У статті запропонована система організації віддаленого доступу до навчального обладнання на основі програмного забезпечення *Raspberry Pi* та *AnyDesk*. Аналіз методів показав, що найбільш ефективним є використання віддаленого робочого столу, оскільки він поєднує в собі простоту реалізації та взаємодії з реальним обладнанням.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні комплексного підходу до організації дистанційного доступу до лабораторного обладнання, що передбачає:

- створення архітектури системи віддаленого моніторингу, що поєднує *Raspberry Pi*, *AnyDesk*

і спеціалізоване програмне забезпечення для керування обладнанням;

– адаптацію та інтеграцію різних типів лабораторного обладнання в єдину систему віддаленого доступу.

На відміну від ПЛК, *Raspberry Pi* дає змогу легко реалізувати необхідну логіку управління та інтерфейси для обладнання. Користувач з ПК через *AnyDesk* може керувати приводами й аналізувати показники датчиків і відео в режимі реального часу.

Запропонований підхід може бути впроваджений навчальними закладами для організації дистанційних лабораторних робіт з інженерних дисциплін в умовах карантину та воєнного стану.

Для подальших досліджень пропонується:

– розширити функціональні можливості системи за допомогою інтеграції елементів штучного інтелекту для автоматизації процесів управління та аналізу даних;

– розширити сферу застосування системи віддаленого моніторингу додаванням функцій керування роботизованим обладнанням виробничого та спеціального призначення;

– дослідити можливості масштабування системи для одночасної роботи великої кількості користувачів;

– розробити методи оцінювання ефективності навчання із застосуванням запропонованої системи порівняно з традиційними методами лабораторних робіт.

Список літератури

- Smith J. Using Remote Desktop Software in Engineering Labs, *International Online Engineering Journal*, 2021, No. 17(4), P. 12–21.
- Williams A. and Brown T. Remote systems based on PLC for training, *Procedia Manufacturing*, 2020, No. 45, P. 36–40.
- Atzori L., Iera A. and Morabito G. The internet of things: A survey, *Computer networks*, No. 54 (15), 2010. P. 2787–2805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Farhangi H. The path of the smart grid, *IEEE power and energy magazine*, No. 8(1), 2010. P. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>
- Marescaux J. and Rubino F. Telesurgery, telerobotics, virtual surgery, and telerobotics, *Current urology reports*, No. 4(2), 2003. P. 109–113.
- Taylor, M. and Wilson, J. (2011) "Virtual laboratory exercises with MATLAB", *European Journal of Engineering Education*, No. 36(6), P. 613–626.
- Cooper M. and Ferreira J.M. Remote laboratories expanding access to science and engineering curriculum, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, No. 2(4), 2009. P. 342–353. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLT.2009.43>
- Potkonjak V., Gardner M., Callaghan V., Mattila P., Guetl C., Petrović V.M. and Jovanović K. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review", *Computers & Education*, No. 95, 2016. P. 309–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- Uran S., Hercog D. and Jezernik K. Remote control laboratory with Moodle booking system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, No. 54(6), 2007. P. 3057–3068. DOI:10.1109/ISIE.2007.4375089
- Petruzella F.D. *Programmable logic controllers*, 5th edn. McGraw-Hill Education, New York, 2016. 414 p.
- Alphonsus E.R. and Abdullah M.O. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 60, 2016. P. 1185–1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
- Rehg J.A. and Sartori G.J. *Programmable logic controllers*, 3rd edn. Pearson, London, 2019. 565p.
- Guimarães E., Maffei A., Pereira J., Russo B., Cardozo E., Bergerman M. and Magalhães M.F. REAL: A virtual laboratory for mobile robot experiments, *IEEE Transactions on Education*, No. 46 (1), 2003. P. 37–42. DOI:10.1109/TE.2002.804404
- Howard S.K. and Gigliotti A. Having a go: Looking at teachers' experience of risk-taking in technology integration, *Education and Information Technologies*, 2016. No. 21(5), P. 1351–1366. DOI:10.1007/s10639-015-9386-4
- Andujar J.M., Mejías A. and Márquez M.A. Augmented reality for the improvement of remote laboratories: an augmented remote laboratory, *IEEE Transactions on Education*, No. 54(3), 2011. P. 492–500. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2010.2085047>
- Maksimovic M., Vujovic V., Perisic B. and Milosevic V. Developing a fuzzy logic based system for monitoring and early detection of residential fire based on thermistor sensors, *Computer Science and Information Systems*, No. 11(2), 2014. P. 665–681. DOI:10.2298/CSIS140330090M

17. García-Zubía J., Cuadros J., Romero S., Hernández-Jayo U., Orduña P., Guenaga M., Gonzalez-Sabate L. and Gustavsson I. Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics", *IEEE Transactions on Education*, No. 60(2), 2017. P. 149–156. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2016.2608790>
18. Heradio R., de la Torre L., Galan D., Cabrerizo F.J., Herrera-Viedma E. and Dormido S. Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis, *Computers & Education*, No. 98, 2016. P. 14–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>

References

1. Smith, J. (2021), "Using Remote Desktop Software in Engineering Labs", *International Online Engineering Journal*, No. 17(4), P. 12–21.
2. Williams, A. and Brown, T. (2020), "Remote systems based on PLC for training", *Procedia Manufacturing*, No. 45, P. 36–40.
3. Atzori, L., Iera, A. and Morabito, G. (2010), "The internet of things: A survey", *Computer networks*, No. 54(15), P. 2787–2805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
4. Farhangi, H. (2010), "The path of the smart grid", *IEEE power and energy magazine*, No. 8(1), P. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>
5. Marescaux, J. and Rubino, F. (2003), "Telesurgery, telerobotics, virtual surgery, and telerobotics", *Current urology reports*, No. 4(2), P. 109–113.
6. Taylor, M. and Wilson, J. (2011), "Virtual laboratory exercises with MATLAB", *European Journal of Engineering Education*, No. 36(6), P. 613–626.
7. Cooper, M. and Ferreira, J.M. (2009), "Remote laboratories expanding access to science and engineering curriculum", *IEEE Transactions on Learning Technologies*, No. 2(4), P. 342–353. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLT.2009.43>
8. Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V.M. and Jovanović, K. (2016), "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review", *Computers & Education*, No. 95, P. 309–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
9. Uran, S., Hercog, D. and Jezernik, K. (2007), "Remote control laboratory with Moodle booking system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, No. 54(6), P. 3057–3068. DOI: [10.1109/ISIE.2007.4375089](https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4375089)
10. Petruzella, F.D. (2016), *Programmable logic controllers*, 5th edn. McGraw-Hill Education, New York, 414 p.
11. Alphonsus, E.R. and Abdullah, M.O. (2016), "A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 60, P. 1185–1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>
12. Rehg J.A. and Sartori G.J. *Programmable logic controllers*, 3rd edn. Pearson, London, 2019. 565 p.
13. Guimarães, E., Maffei, A., Pereira, J., Russo, B., Cardozo, E., Bergerman, M. and Magalhães, M.F. (2003), "REAL: A virtual laboratory for mobile robot experiments", *IEEE Transactions on Education*, No. 46(1), P. 37–42. DOI: [10.1109/TE.2002.804404](https://doi.org/10.1109/TE.2002.804404)
14. Howard, S.K. and Gigliotti, A. (2016), "Having a go: Looking at teachers' experience of risk-taking in technology integration", *Education and Information Technologies*, No. 21(5), P. 1351–1366. DOI: [10.1007/s10639-015-9386-4](https://doi.org/10.1007/s10639-015-9386-4)
15. Andujar, J.M., Mejías, A. and Márquez, M.A. (2011), "Augmented reality for the improvement of remote laboratories: an augmented remote laboratory", *IEEE Transactions on Education*, No. 54(3), P. 492–500. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2010.2085047>
16. Maksimovic, M., Vujovic, V., Perisic, B. and Milosevic, V. (2014), "Developing a fuzzy logic based system for monitoring and early detection of residential fire based on thermistor sensors", *Computer Science and Information Systems*, No. 11(2), P. 665–681. DOI: [10.2298/CSIS140330090M](https://doi.org/10.2298/CSIS140330090M)
17. García-Zubía J., Cuadros J., Romero S., Hernández-Jayo U., Orduña P., Guenaga M., Gonzalez-Sabate L. and Gustavsson, I. (2017), "Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics", *IEEE Transactions on Education*, No. 60(2), P. 149–156. DOI: <https://doi.org/10.1109/TE.2016.2608790>
18. Heradio, R., de la Torre, L., Galan, D., Cabrerizo, F.J., Herrera-Viedma, E. and Dormido, S. (2016), "Virtual and remote labs in education: A bibliometric analysis", *Computers & Education*, No. 98, P. 14–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.03.010>

Надійшла (Received) 21.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Посашков Олег Юрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oleh.posashkov@nure.ua; ORCID ID: 0000-0002-9262-6259

Цимбал Олександр Михайлович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.tsymbal@nure.ua; ORCID ID: 0000-0002-4947-7446

Posashkov Oleh – Kharkiv National University of Radio Electronics, PhD student at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Tsymbal Oleksandr – Doctor of Science (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

DEVELOPMENT OF THE ARCHITECTURE OF THE REMOTE ACCESS SYSTEM TO EDUCATIONAL LABORATORY EQUIPMENT USING AUTOMATED SOLUTIONS

The **subject of the study** is remote access to Raspberry Pi-based training equipment and remote desktop software. The **purpose** of the work is to analyze the means of remote control of equipment and develop the architecture of the system of remote access of students to laboratory equipment for the implementation of distance learning. The following tasks are solved in the article: the branches in which application of means of remote access is the most critical are analyzed, among which the special place is occupied by the educational branch; analysis of existing methods of organization of remote access to training equipment was carried out, advantages and disadvantages of each method were allocated; justification is being made for choosing a Raspberry Pi minicomputer as a hardware platform for building remote access systems; describes the architecture of a complex of technical solutions based on Raspberry Pi for remote control of educational laboratory equipment; implementation of applied system of temperature and humidity monitoring using developed approach is described. **Research methods** include comparative analysis of existing remote control technologies, prototyping and experimental testing of the developed system. The following **results** were obtained: the feasibility of using the remote desktop approach and AnyDesk software for organizing access was substantiated, a system based on the Raspberry Pi minicomputer for managing equipment and visualizing data was developed, an applied system for monitoring temperature and humidity using Raspberry Pi and AnyDesk was implemented. **Conclusions:** The proposed approach of using Raspberry Pi and remote desktop software allows students to effectively organize remote access to laboratory equipment from engineering disciplines during distance learning. This solution combines ease of implementation, interaction with real physical equipment and low cost compared to the use of industrial PLCs.

Keywords: Raspberry Pi; remote access; equipment control; graphical user interface.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Посашков О. Ю., Цимбал О. М. Розроблення архітектури системи віддаленого доступу до навчального лабораторного обладнання з використанням автоматизованих рішень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 64–75. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.064>

Posashkov, O., Tsymbal, O. (2024), "Development of the architecture of the remote access system to educational laboratory equipment using automated solutions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 64–75. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.064>

Т. РАДІВІЛОВА, Л. КІРІЧЕНКО, В. ПАНТЕЛЄЄВ, А. МАЗЕПА, В. БІЛОДІД

АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТЕНТИФІКАЦІЇ ДЛЯ ВЕБЗАСТОСУНКІВ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ВЕБЗАСТОСУНКУ З ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ АВТЕНТИФІКАЦІЇ

Предметом дослідження є методи й засоби безпечної автентифікації користувачів у вебзастосунках. **Мета роботи** – аналіз методів автентифікації та реалізація вебзастосунку із системою автентифікації з інтеграцією *JWT*-токенів і стандарту *OAuth v2.0*. У статті розв’язуються такі **завдання**: аналіз основних протоколів і методів автентифікації користувачів у вебзастосунках, реалізація автентифікації на основі стандарту *OAuth 2.0* та *JWT Access/Refresh*-токена; дослідження ризиків вразливостей і атак для реалізованих вебзастосунків. Упроваджено такі **методи**: порівняння, емпіричний аналіз, розрахункові методи. **Досягнуті результати**: проаналізовано протоколи та методи автентифікації користувачів у вебзастосунках; обрано методи автентифікації *JWT*-токенів і стандарту *OAuth v2.0* для побудови сучасних вебпрограм; створено вебзастосунок на основі обраних методів автентифікації у вебзастосунках; описано ризики реалізації вразливостей і атак у вебпрограмах. **Висновки**. Проаналізовано найбільш відомі методи автентифікації у вебзастосунках, що показало наявність багатьох недоліків, які спричиняють значні ризики в процесі використання вебпрограм. Створено стандартний вебзастосунок на основі конструктора вебпрограм *shopify* з автентифікацією на основі *Hypertext Transfer Protocol cookie session* та проаналізовано ризики вразливостей і атак на нього, унаслідок чого встановлено, що ризики є дуже високими. Обрано два найбезпечніших методи автентифікації для реалізації вебзастосунку: *JWT Access/Refresh*-токена з *browser fingerprints* та стандарту *OAuth 2.0*, на основі яких реалізовано вдосконалений вебзастосунок. Проаналізовано ризики вразливостей і атак на вдосконалений вебзастосунок, який показав, що ризики реалізації вразливостей і атак на нього є дуже низькими. Реалізація, налаштування та аналіз упровадження методу автентифікації *JWT Access/Refresh*-токена в поєднанні з *browser fingerprints* показали, що ця комбінація забезпечує найбільш надійне запобігання викрадення токенів та застосування їх з іншого комп’ютера. Також реалізовано автентифікацію за допомогою *OAuth 2.0*. У дослідженні було виявлено, що делегування автентифікації на сервіси *Facebook* або *Google* можуть забезпечити низький рівень ризику реалізації атак і вразливостей на вебзастосунок.

Ключові слова: автентифікація; комплексна система автентифікації; *OAuth*; *JWT*; токен; вебзастосунок.

Вступ

Інтернет став одним з основних стандартів сучасної людини, він пронизує практично всі аспекти нашого життя – від акаунтів у соцмережах до банківських рахунків. Усю цю важливу для людини інформацію, втрата якої може спричинити чимало проблем, захищають багатьма різними методами [1–3].

Завжди існує питання вибору між необхідним рівнем захисту та ефективністю роботи в мережі [4]. У деяких випадках заходи щодо забезпечення безпеки є занадто складними, що може викликати неможливість отримання потрібної інформації навіть для авторизованих для цього користувачів [5, 6]. Однак засоби захисту даних дають змогу забезпечити конфіденційність, цілісність та доступність інформації за умов впливу на неї різного виду загроз та зменшити ризики втрати чи викрадення конфіденційних даних.

Зважаючи на перелічені чинники, можна зробити висновок, що пріоритет безпеки інформації у вебсередовищі є найвищим у нинішніх реаліях. Особливо це стосується вебзастосунків, що є одними із найбільш вразливих об’єктів у мережі. Одним із ключових аспектів безпеки вебзастосунків є автентифікація, яка передбачає перевірку особи користувачів, що отримують доступ до вебзастосунків. Автентифікація необхідна для перевірки особи користувача або системи, які хочуть отримати доступ до сервісів та інформації. Через неправильну реалізацію автентифікації зловмисники можуть скористатися вразливостями автентифікації, реалізувати атаки на вебзастосунок для отримання несанкційного доступу. Чимало вчених досліджували безпеку методів автентифікації та авторизації та їх впровадження у вебзастосунках, з чого випливає необхідність аналізу наукових робіт і та іншої літератури.

Аналіз публікацій та постановка завдання

Нині поширеним є використання рішення єдиного входу *Single Sign-On* (SSO), тобто одного облікового запису для автентифікації на багатьох сайтах, як це зазначено в роботах [7, 8]. Це рішення ґрунтується на впровадженні методів автентифікації *OAuth*, *OpenID*, токенів та інших, що, відповідно, мають бути захищені. Крім того, важливо, щоб системи SSO також задовольняли високі вимоги безпеки та конфіденційності. Однак науковець *Schmitz Guido* [9] виявив серйозні вразливості в системах SSO, що призводять до критичних атак на їх безпеку та конфіденційність.

Безпекою протоколу *OAuth 2.0*, який використовується в SSO, зацікавились автори роботи [10], які за допомогою тестування 75 вебсайтів виявили вразливості протоколу за неналежної конфігурації сайтів. Також вони розробили розширення для браузера, що успішно ідентифікує та попереджає користувача про неналежні налаштування *OAuth 2.0*. Але в роботі не наведено способи розв'язання проблем безпеки на стороні сервера. Для забезпечення кращої безпеки автори роботи [11] провели симуляцію протоколу *OAuth 2.0* і запропонували додаткові функції, ґрунтовані на використанні токенів, які можуть покращити архітектурний дизайн і підвищити загальну ефективність безпеки протоколу, але не подали конкретних рішень. У праці [12] для продовження часу доступу до захищених ресурсів для автентифікованих користувачів запропоновано унікальний підхід, оснований на технологіях використання *OAuth* і токенів. Але це є рішенням вузькоспрямованої проблеми.

У роботі [13] автори спроектували спрощений сервіс для автентифікації, авторизації користувачів та управління ними у веб- та мобільних програмах на основі *OAuth* та *OpenID*. Однак розроблений сервіс є небезпечним, особливо для застосунків, що зберігають вразливу інформацію. Над аналізом цієї проблеми працювали автори праці [14]. Вони розробили метод відкликання токена за допомогою запиту на відкликання до сервера авторизації, коли сервер ресурсів виконує аномальну поведінку з використанням токена, наприклад вихід із системи або зміна ідентичності власника ресурсу. Але фахівці не запропонували способи розв'язання інших проблем безпеки.

У роботі [15] проаналізовано програмні продукти, що реалізують підтримку технології єдиного входу SSO на основі *Security Assertion Markup Language* (SAML) або *OpenID*, подано рекомендації щодо конкретного вибору. Автори дослідження [16] описали протокол *OpenID Connect*, який використовується в стандарті SSO. На основі аналізу визначено ризики для конфіденційності, пов'язані з доступом користувачів до систем SSO за допомогою протоколу *OpenID Connect*. Але в студіях [15, 16] не запропоновано способи розв'язання проблем безпеки. Питання безпеки використання токенів та *OAuth* також досліджували автори роботи [17]. Вони провели SSO-тестування між системами, проаналізували валідацію токенів, перевірили структуру *JSON Web Token* (JWT) та мережну атаку на перехоплення даних (*Network Sniffing Attack*). Однак системи SSO вразливі не тільки до цієї атаки.

Отже, проблема забезпечення безпеки вебзастосунків є актуальною. З огляду літератури зрозуміло, що потрібно проаналізувати методи та стандарти автентифікації для вебпрограм, спираючись на результати вивчення, розробити вебзастосунок із безпечною системою автентифікації та порівняти його якість із стандартним вебзастосунком.

Метою цієї роботи є аналіз методів автентифікації та реалізація вебзастосунку із системою автентифікації з інтеграцією JWT-токенів і стандарту *OAuth v2.0*.

Огляд методів автентифікації

Процесу автентифікації користувача передують його ідентифікація [18]. Під час ідентифікації інформація про особу надається у формі ідентифікатора для системи безпеки. Система безпеки шукатиме всі абстрактні об'єкти в наборі ідентифікаторів і знайде конкретний об'єкт, що застосовує реальна людина. Як тільки це буде зроблено, користувач буде ідентифікований. Наприклад, об'єктом може бути *id* акаунта користувача. Той факт, що особу ідентифіковано, не обов'язково означає, що вона справжня. Користувач має надати докази, що підтверджують його особу в системі, наприклад пароль, який називається обліковими даними. Їх перевірка є процесом автентифікації. Якщо автентифікація була успішною, то користувача буде авторизовано до системи з наданням назначених йому прав

доступу. Автентифікація необхідна для захищеного вебзастосунку.

Найбільш використовуваними є такі методи автентифікації [19]:

- автентифікація на основі файлів *Cookie*;
- автентифікація за допомогою токенів;
- сторонній доступ (*OAuth*, токен *Application Programming Interface (API)*);
- *OpenID*;
- *SAML*.

Автентифікація на основі

Hypertext Transfer Protocol Cookie session

Hypertext Transfer Protocol (HTTP) Cookie session – це крок до більш надійних і складних методів автентифікації. Усі запити HTTP не мають статусу [19], тобто неможливо зберігати інформацію про взаємодію, що відбулася між сервером і користувачем. Для того, щоб розв'язати цю

проблему, була створена функція HTTP-сесії, що дає змогу вебсерверам зберігати дані (запити / відповіді) взаємодії між користувачами та серверами. Вони зберігають інформацію, основу на конкретній сесії (ідентифікатор сесії, час створення, останній доступ тощо), а також відомості про користувача (стан входу в систему та інші дані, які можуть знадобитися застосунку від користувача). Сесії можуть бути реалізовані за допомогою файлів *Cookie*, тобто невеликого фрагменту даних, який сервер надсилає веббраузеру користувача. Браузер може зберігати його і відправляти назад із запитом на той самий сервер. Файли *Cookie* застосовуються для автентифікації особи та містять конфіденційну інформацію, мають невеликий обсяг, але за умови значної кількості сесій і користувачів обсяг даних для зберігання стає проблемою. У табл. 1 наведено переваги та недоліки автентифікації на основі HTTP *Cookie session*.

Таблиця 1. Переваги та недоліки автентифікації на основі HTTP *Cookie session*

Переваги	Недоліки
Файли <i>Cookie</i> займають дуже мало місця.	Файли <i>Cookie</i> вразливі до <i>XSS</i> - та <i>CSRF</i> -атак.
Файли <i>Cookie</i> прості у використанні.	Масштабування стає проблемою, коли багато користувачів входять у систему.
Файли зберігаються на сервері та їх набагато важче вкрасти або підмінити.	Містять конфіденційну інформацію про користувача, що робить його мішенню для зловмисників.
Інформацію, яку записують у <i>Cookie</i> , зашифровують перед відправленням, а самі <i>Cookie</i> передають за протоколом <i>HTTPS</i> .	Налаштування використання та відправлення <i>Cookie</i> залежить від розробника сайту, який може зробити некоректні налаштування.

Основні принципи автентифікації на основі технології *token*

Як і для попереднього методу автентифікації за допомогою *Cookie session* для цієї стратегії немає конкретного зразка, унаслідок цього всі реалізації специфічні для певних систем. Автентифікація на основі технології *token* найчастіше застосовується в побудові розподілених систем *SSO*, де один застосунок (*service provider* або *relying party*) делегує функцію автентифікації користувачів іншому застосунку (*identity provider* або *authentication service*) [19]. Типовим прикладом цього способу є вхід у програму через обліковий запис у соціальних мережах. Тут соціальні мережі є сервісами автентифікації, а застосунок довіряє функцію автентифікації користувачів обраній соціальній мережі.

Реалізація цього способу полягає в тому, що постачальник ідентифікаційної інформації надає достовірні відомості про користувача у вигляді токена, а застосунок постачальника послуг використовує цей токен для ідентифікації, автентифікації

та авторизації користувача. Постачальник ідентифікаційних даних здебільшого використовується в стандартах на зразок *OAuth 2.0*, які застосовують делегування автентифікації. Постачальника ідентифікаційних даних можна буде оминати в деяких реалізаціях автентифікації за токеном доступу. Наприклад, деякі реалізації з *JWT*-токеном не потребують додаткового постачальника ідентифікаційної інформації для генерації токена. Сам сервер створює токен, відправляє та приймає його з клієнта.

Автентифікація на основі *JSON Web Token (JWT)*

JWT є механізмом перевірки власника деяких даних *JSON*. Це зашифрований рядок, що може містити необмежену кількість інформації (на відміну від файлу *Cookie*) і має криптографічний підпис [20].

Коли сервер отримує *JWT*, він може гарантувати, що даним у цьому рядку можна довіряти, оскільки він підписаний криптографічним підписом. Жоден

посередник не може змінити *JWT* після його відправлення. Важливо зауважити, що *JWT* гарантує володіння інформацією, але не шифрування. Тобто дані *JSON*, які зберігаються в *JWT*, не зашифровані, і їх можна побачити в процесі перехоплення токена. З цієї причини настійно рекомендується використовувати *HTTPS* із *JWT*. Одним із найскладніших рішень щодо реалізації *JWT* є місце зберігання токена, таким чином безпека автентифікації на основі *JWT* залежатиме від налаштувань розробника сайту. Токен має зберігатися в безпечному місці в браузері користувача: *local storage/session storage*; *Cookie*-файл; у пам'яті застосунку.

У першому випадку, якщо токен зберігається всередині *LocalStorage* або *Session Storage*, він доступний кожному скрипту на вебсторінці. Атака

Cross-site scripting (XSS) може дозволити зловмисникові отримати доступ до токенів. Не рекомендується зберігати токен у локальному сховищі або сховищі сеансів.

У другому випадку токени, що зберігаються у *Cookie*-файлах, вразливі до *CSRF*-атак (*Cross-site request forgery*). Тому також не рекомендовано зберігати їх у *Cookie*-файлах.

Якщо будь-який із скриптів, доданих у вебсторінку, буде скомпрометовано, то зловмисник зможе отримати доступ до всіх токенів, які зберігаються в браузерах. Саме тому найправильнішим рішенням буде зберігання токена безпосередньо в пам'яті застосунку, до якої не буде можливості дістатися звичайними методами. У табл. 2 наведені переваги та недоліки використання *JWT*-токена.

Таблиця 2. Переваги та недоліки використання *JWT*-токена

Переваги	Недоліки
Масштабованість сервера не змінюється в разі збільшення кількості користувачів.	Розмір <i>JWT</i> значно більший за ідентифікатор сеансу <i>Cookie</i> .
Не має стану – вебзастосунок не зобов'язаний зберігати інформацію сесії на сервері, що зменшує навантаження на сервер, покращує продуктивність та масштабованість.	<i>JWT</i> не може відкликати доступ до користувача.
<i>JWT</i> містить більше інформації про користувача.	Токен зберігається на стороні клієнта, що робить його вразливим для зловмисників.
Переносимість – дає змогу міждоменну та міжплатформну автентифікацію та авторизацію.	Схильність до крадіжок, тобто якщо хтось викраде <i>JWT</i> у користувача або системи, він може застосувати його, щоб привласнити їхню особистість і отримати доступ до їхніх ресурсів.
Адаптованість – містить будь-яку інформацію щодо вебзастосунку, яка дає змогу контролювати доступ у точний і персоналізований спосіб.	

Автентифікація на основі *Access/Refresh*-токенів

Для підвищення безпеки автентифікації на основі *JWT*-токена було запропоновано розмежування між видами токенів на *Access* і *Refresh* [21, 22]. *Access*-токен використовується для авторизації запитів і зберігання додаткової інформації про користувача. *Refresh*-токен видається сервером за результатами успішної автентифікації та застосовується для отримання нової пари *Access/Refresh*-токенів. Частіше за все зберігається в базі даних сервера. Кожен токен має свій термін життя, наприклад *Access* – 30 хв, а *Refresh* – 60 днів. *Refresh*-токен зберігається на сервері для обліку доступу та інвалідації крадених токенів. Таким чином сервер точно визначає, кому дозволено авторизуватися.

Для використання можливості автентифікації на більш ніж одному девайсі необхідно зберігати всі *Refresh*-токени щодо кожного користувача.

У момент *Refresh*, тобто оновлення *Access*-токена, оновлюються обидва токени – *Access* та *Refresh*. *Refresh*-токен у момент *Refresh* порівнює себе з тим *Refresh*-токеном, що лежить в базі даних, і в разі успіху, а також якщо в нього не завершився термін, система оновлює токени. *Refresh*-токен має термін життя в разі, якщо користувач буде в офлайні понад 60 днів, тоді доведеться заново вводити логін / пароль.

Fingerprint браузера – це інструмент ідентифікації браузера користувача. Це геш, згенерований на базі деяких унікальних параметрів браузера. Перевага *fingerprint* полягає в тому, що в процесі генерації це значення буде унікальним для конкретного браузера користувача та не змінюватиметься в майбутньому. Тому скомпрометувати *fingerprint* браузера дуже важко.

Автентифікація на основі мови розмітки тверджень безпеки SAML

SAML – це стандарт автентифікації та авторизації, варіант розширеної мови розмітки (*Extensible Markup Language, XML*) для обміну інформацією про безпеку в інтернеті.

Обмін *SAML* відбувається між системними об'єктами, що називаються стороною, яка підтверджує (також називається органом *SAML*), і стороною, яка довіряє та обробляє отримані нею підтвердження безпеки [19, 21]. Підтвердження безпеки – це стандартизовані підтвердження мовою розмітки, які визначають рішення щодо контролю доступу.

Існує два типи єдиного входу (*Single Sign-On, SSO*) *SAML*: з ініціативи постачальника ідентифікаційних даних (*Identity Provider, IdP*) та з ініціативи постачальника послуг (*Service Provider, SP*). Обидва використовують *IdP* для автентифікації користувача, основна різниця полягає у відправній точці. *SAML SSO* з ініціативою *IdP*: користувач намагається увійти до *IdP*, а *IdP* може безпосередньо перевірити особу користувача за допомогою *SAML*-відповіді. *SAML SSO*, ініційоване *SP*: користувач намагається увійти до *SP*, і *SP* має згенерувати *SAML*-запит. Запит і користувач надсилаються *IdP* для автентифікації, а потім повертаються до *SP* для завершення входу.

Автентифікація на основі протоколу автентифікації OpenID Connect

OpenID Connect – це протокол автентифікації, побудований на основі *OAuth 2.0*. Він дозволяє користувачам автентифікуватися та обмінюватися своєю ідентифікаційною інформацією із застосунками та сервісами в стандартизований спосіб [19, 21].

Однак основна різниця між *OAuth 2.0* і *OpenID Connect* полягає в типі токенів, що видаються. *OAuth 2.0* випускає токени доступу, що зазвичай мають обмежений термін дії та видаються для певного набору дозволів. *OpenID Connect* випускає токени ідентифікації, що застосовуються для автентифікації користувача та надання ідентифікаційної інформації застосунку. Хоча *OAuth 2.0* і *OpenID Connect* використовують схожі потоки й механізми, різниця між токенами доступу та ідентифікаційними токенами є важливою. Токени доступу використовуються для авторизації, дозволяючи програмі отримати доступ до захищених ресурсів, тоді як токени ідентифікації застосовуються для автентифікації, підтверджуючи особу користувача.

Переваги та недоліки різних методів автентифікації

Для автентифікації вебзастосунків використовуються кілька методів, зокрема файли *Cookie*, *JWT*, *OAuth*, *API Token*, *SAML* та *OpenID*, описані вище. Залежно від сценарію застосування та вимог безпеки вони мають різні переваги та недоліки (табл. 3).

Таблиця 3. Переваги та недоліки найпоширеніших методів автентифікації

Метод	Переваги	Недоліки
<i>Cookies</i>	Прості в реалізації та широко підтримуються, зберігають інформацію про сеанс, налаштування або інші дані для ідентифікації користувача або налаштування користувацького досвіду.	Вразливі до <i>CSRF</i> -атак, додають накладні витрати до кожного запиту, обмежують розмір і кількість.
<i>JWT</i>	Бездержавний, може переносити більше даних, може підтримувати кілька доменів або служб, може бути перевірений будь-ким, хто має доступ до ключа.	Вразливий до <i>XSS</i> -атак, має фіксований термін дії, не може бути легко відкликаний або оновлений.
<i>OAuth</i>	Дозволяє користувачеві надавати доступ до своїх ресурсів або інформації з одного сайту іншому сайту без обміну обліковими даними, може використовувати різні типи токенів, такі як <i>JWT</i> -, <i>API</i> -токени або <i>SAML</i> -твердження.	Складний і вимагає участі багатьох сторін та взаємодії, створює певні ризики для безпеки, такі як фішингові атаки, витік токенів або їх повторне відтворення.
<i>SAML</i>	Дозволяє користувачеві входити на один сайт і отримувати доступ до іншого сайту без повторного введення облікових даних, використовує твердження, що містять інформацію про особу користувача, атрибути або рішення про авторизацію, може бути підписана й зашифрована постачальником ідентифікації та перевірена постачальником послуг.	Складний і вимагає оброблення та розбору <i>XML</i> , має деякі проблеми з продуктивністю через розмір і кількість повідомлень, що беруть участь.
<i>OpenID</i>	Дозволяє користувачеві входити на один сайт і застосовувати свій ідентифікатор для доступу до іншого сайту без створення облікового запису або повторного введення облікових даних, може використовувати різні типи токенів для подання ідентифікаційної інформації.	Складний, вимагає участі багатьох сторін і взаємодії, створює певні ризики для безпеки, такі як фішингові атаки, підроблення ідентифікаторів або витік токенів.

Оскільки із загального порівняння складно зробити висновок, то більш детально порівняємо методи автентифікації *Cookie* та *JWT token*, *OAuth* і *SAML*.

Порівняння використання *Cookie* та *JWT token*

На цей час найбільш поширеними методами автентифікації є *Cookie sessions* та *JWT token* [21]. У табл. 4 наведено результати порівняння цих двох методів за такими параметрами: масштабованість, безпека, сервіси *API RESTful*, продуктивність. Необхідно зауважити, що розглядається стандартна

реалізація алгоритму *JWT token* без специфічних змін. Прикладом є *Refresh*-токен.

Зважаючи на результати аналізу, можна зробити висновок, що метод автентифікації *Cookie sessions* відходить на другий план порівняно з *JWT*-токеном. У контексті використання *JWT*-токена із програмами невеликого розміру можна застосовувати звичайну *JWT*-автентифікацію без *Refresh*-токена, яка повністю замінить сесійний варіант із *Cookie sessions*. У разі потреби застосування *JWT* із програмами середнього та великого розміру можна використовувати комбінацію *Access/Refresh*-токена та *fingerprints* браузерів.

Таблиця 4. Параметри використання методів автентифікації *Cookie* та *JWT token*

Параметри	<i>Cookie sessions</i>	<i>JWT token</i>
Масштабованість	Інформація сеансу зберігається в пам'яті на сервері або в базі даних. У сценарії горизонтального масштабування створюється окрема центральна система зберігання сеансів, до якої мають доступ усі сервери застосунків.	Легко масштабується, оскільки можна використовувати маркери для доступу до ресурсів з різних серверів, що економить витрати, оскільки не потрібен виділений сервер для зберігання сесій споживачів.
Безпека	У стратегії <i>Cookie session</i> усі дані зберігаються на сервері, тому вважаються відносно захищеними.	Завдяки підпису за допомогою секретного ключа на сервері токен не можна змінити непомічено без доступу до секретного ключа. Зберігання токена в будь-якому місці, окрім пам'яті застосунку, є дуже ризиковим.
Сервіси <i>API RESTful</i>	Збереження стану застосунку. <i>API</i> -інтерфейс досить часто обслуговується з одного сервера, а в реальності застосунок використовує його з іншого.	<i>RESTful API</i> не має стану, тож не важливо, звідки <i>API</i> або застосунок обслуговується.
Продуктивність	Накладні витрати не значні, оскільки в процесі кодування розмір <i>JWT</i> буде в кілька разів перевищувати розмір ідентифікатора <i>SESSION</i> .	Значне навантаження під час кожного <i>HTTP</i> -запиту. Однак <i>JWT</i> обмінюють розмір на можливість зберігати інформацію на стороні клієнта. Наприклад, привілеї в самому токени або <i>id</i> користувача.

Порівняння методів автентифікації та авторизації *OAuth* і *SAML*

Для досягнення мети роботи та реалізації автентифікації у вебзастосунку необхідне використання облікового запису єдиного входу. Перевага облікового запису єдиного входу (*single sign-on – SSO*) полягає в тому, що користувачі входять у систему один раз, застосовуючи один набір облікових даних, у цьому разі вони можуть отримувати доступ до декількох сервісів і застосунків протягом одного сеансу [21]. Єдиний вхід використовується для управління автентифікацією та безпечним доступом до

корпоративних мереж, вебзастосунках тощо. Для впровадження *SSO* найчастіше впроваджуються стандарти *SAML* (*Security Assertion Markup Language, SAML*), *OAuth*, рідше – *OpenID Connect*. Результати аналізу використання методів *SAML* та *OAuth* для реалізації єдиного входу наведено в табл. 5.

Беручи до уваги подане порівняння, для реалізації було обрано два методи автентифікації у вебзастосунку: *JWT*-токени та *OAuth 2.0*. Тож розглянемо технології захисту вебпрограми, які було використано для реалізації захищеного вебзастосунку із впровадженням зазначених підходів автентифікації.

Таблиця 5. Параметри впровадження методів автентифікації *Security Assertion Markup Language* та *Open Authorization*

Параметри	<i>SAML</i>	<i>OAuth</i>
Робочий процес	Передбачає обмін інформацією між підтверджувальною стороною (органом <i>SAML</i>) і стороною, що покладається на нього, використовуючи підтвердження безпеки у форматі <i>XML</i> .	Основа на взаємодії між власником ресурсу, сервером ресурсу, клієнтом (застосунком) і сервером авторизації.
<i>SSO (Single Sign-On)</i>	Підтримує <i>SSO</i> за допомогою передачі інформації про автентифікацію та авторизацію між вебсерверами.	Вмикає <i>SSO</i> , дозволяючи автентифікованим користувачам в одному застосунку авторизувати сторонні програми для доступу до даних користувача.
Безпека	Вважається більш безпечним завдяки можливості шифрування тверджень, що підходить для оброблення конфіденційної інформації.	Зосереджується на делегуванні доступу через токени, що не передбачає шифрування тверджень.
Інтероперабельність	Використовується організаціями з великими інвестиціями в <i>XML</i> і тими, що потребують безпечного, федеративного управління ідентичностями.	Підтримує різні типи клієнтів, зокрема веб-, мобільні та десктопні застосунки, що робить його цінним для розробників мобільних програм і сервісів у відкритому інтернеті.
Основні чинники	Еволюція <i>SSO</i> , розширення федеративного управління ідентичностями, зміна галузевих стандартів.	Простота для розробників, потреба в обмеженому обміні інформацією про користувачів з іншими застосунками, спільна рекламна діяльність між великими інтернет-компаніями.
Шифрування та безпека	Дозволяє шифрувати твердження, забезпечуючи вищий рівень безпеки для обміну конфіденційними даними.	Переважно зосереджується на доступі на основі токенів, без деталізації стандартів шифрування для самих токенів.
Сумісність	Може використовуватися разом з <i>OAuth</i> у середовищах, що вимагають як автентифікації, так і авторизації для різних аспектів управління доступом.	Може інтегруватися із <i>SAML</i> для сценаріїв, де необхідна первинна перевірка ідентичності користувача перед наданням токенів доступу для доступу до ресурсів.
Варіанти використання	Багатофакторне <i>SSO</i> , ідеально підходить для великих організацій та корпоративних застосунків (наприклад, <i>Salesforce, Marketo</i>).	Конфіденційність користувачів, надання доступу до приватних ресурсів на різних вебсайтах або в різних застосунках без передачі ідентифікаційних даних користувача.
Рекомендації щодо впровадження	Найкраще підходить для організацій, які вкладають значні кошти в ресурси <i>XML</i> і потребують надійних методів автентифікації.	Рекомендується для сучасних мобільних застосунків, а також у разі, коли доступ до <i>API</i> є пріоритетним, особливо у відкритому інтернеті.

Опис технологій, що використані для реалізації вебзастосунку

Проаналізуємо безпеку автентифікації вебзастосунку, запропонованого стандартним інтернет-магазином із продажу електротоварів, який розробляється за допомогою конструктора вебпрограм *shopify* [23]. Вебзастосунок є розділенням серверного та клієнтського модулів. Це розділення та технології, використані в процесі розроблення, дають змогу назвати клієнтську частину вебпрограми *Single page application (SPA)*. SPA – це вебзастосунок, що взаємодіє з веббраузером, динамічно переписуючи поточну вебсторінку новими даними, отриманими способом відправлення на кінцеву точку вебсервера запиту, замість того щоб за замовчуванням браузер завантажував цілі нові сторінки [21, 24]. У вебзастосунку реалізовано базовий стандартний функціонал сучасної вебпрограми: автентифікація на основі *Hypertext Transfer Protocol Cookie session*;

контроль доступу з розподіленням на типи користувача та адміністратора; механізм роботи з базою даних *SQL*; механізм роботи із сервісом *paypal*. Було використано стандартні бібліотеки в розробленні клієнтської частини програми. Серверна частина вебзастосунку створена в середовищі розробки *Nodejs* з допоміжною бібліотекою *express* та стандартними бібліотеками, оскільки серверна частина не містить складного функціоналу в роботі з інформацією, що приходить на сервер. Проведемо якісний аналіз ризиків атак і вразливостей стандартного запропонованого вебзастосунку на основі методології *OWASP* та методу експертного оцінювання [25], результати якого подані в табл. 6.

Для кількісного оцінювання ризику результуючому ризику надано значення від 1 до 5, де дуже низькому ризику відповідає значення 1, низькому – 2, середньому – 3, високому – 4, дуже високому – 5. Відповідно до цього значення результуючого ризику для стандартного вебзастосунку інтернет-магазину

дорівнює 49, за максимального значення ризику 55, а мінімального – 11. Зрозуміло, що стандартна реалізація вебзастосунку містить значну кількість серйозних вразливостей, ризику реалізації яких є дуже високими. Саме тому цей вебзастосунок

буде вдосконалено та побудовано систему безпеки, що використовує провідні методи запобігання вразливостям і кращі методи автентифікації. Така система зведе ризик нападу зловмисників до мінімуму та зменшить імовірність реалізації вразливостей.

Таблиця 6. Якісна оцінка ризику стандартного вебзастосунку інтернет-магазину

Назва ризику	Тип вразливості	Збиток	Вірогідність виникнення	Результуючий ризик
Відправлення шкідливого коду на сервер з клієнта через незахищені поля введення	<i>SQL injection</i>	дуже високий	висока	високий
Отримання та оброблення сервером шкідливого коду	<i>SQL injection</i>	дуже високий	дуже висока	дуже високий
Злам пароллю	порушення автентифікації	високий	дуже висока	дуже високий
Викрадення токена сесії	порушення автентифікації	високий	дуже висока	дуже високий
Розкриття паролів під час отримання несанкційного доступу до бази даних	розкриття конфіденційних даних	дуже високий	дуже висока	дуже високий
Викрадення конфіденційної інформації в процесі перехоплення трафіку	розкриття конфіденційних даних	дуже високий	дуже висока	дуже високий
Отримання несанкційного доступу до облікового запису адміністратора	порушення контролю доступу	високий	висока	високий
Отримання несанкційного доступу до функцій адміністратора	порушення контролю доступу	високий	висока	високий
Введення шкідливого коду в клієнтську частину застосунку	<i>XSS</i>	високий	низька	середній
Вразливість відправлення конфіденційної інформації за допомогою вебсайту зловмисника	<i>CSRF</i>	високий	середня	високий
Невчасне знаходження вразливостей у системі	Недостатнє логування та моніторинг	дуже високий	дуже висока	дуже високий

Технології серверної частини вдосконаленого вебзастосунку

У процесі вдосконалення вебпрограми та реалізації безпечних методів автентифікації необхідно розробити сервер вебзастосунку за допомогою безпечних, швидких і ефективних технологій. За основу серверної частини обрано технологію *Nodejs*, яка впроваджується з фреймворком *Express*, як і в стандартній реалізації вебзастосунку. Для звичайної автентифікації взято бібліотеку *jsonwebtoken*, яка уможливує генерацію та перевірку *JWT*. Як автентифікацію на основі стандарту *OAuth 2.0* було взято бібліотеку автентифікації *passportjs* і доповнювальну стратегію автентифікації, що називається *passport-facebook-token*. Хостинг та сертифікування сервера надається хмарним сервісом *Heroku*. Базою даних обрано *PostgreSQL*, що також розміщена на хмарному сховищі *Heroku*. Детальніший перелік бібліотек, використаних у розробленні серверної частини застосунку, наведено в табл. 7.

Таблиця 7. Детальний перелік використаних бібліотек на сервері

Назва	Опис бібліотеки
<i>bcryptjs</i>	Бібліотека для шифрування даних на основі секрету.
<i>body-parser</i>	Бібліотека, необхідна для сприйняття сервером інформації, що надходить від клієнтської частини вебзастосунку.
<i>cookie-parser</i>	Бібліотека, потрібна для сприйняття сервером <i>Cookie</i> -файлів, що надходять від клієнтської частини вебзастосунку.
<i>cors</i>	Бібліотека, необхідна для сприйняття сервером запитів, що надходять від клієнтської частини вебзастосунку.
<i>pg</i>	Бібліотека, необхідна для взаємодії з базою даних <i>PostgreSQL</i> .
<i>express-promise-router</i>	Бібліотека, що допомагає серверу визначити <i>endpoints</i> , до яких звертатиметься клієнт.
<i>express-dynamic-middleware</i>	Допоміжна бібліотека для реалізації автентифікації.

Тепер необхідно обрати технології, що використовуються на стороні клієнта.

Технології клієнтської частини вдосконаленого вебзастосунку

За основу клієнтської частини взято технологію *JavaScript*, яка використовується з фреймворком *React*. Для ініціювання *OAuth 2.0* автентифікації взято бібліотеку *react-facebook-login*, що дає змогу почати процес автентифікації за допомогою сервісу *Facebook*. Хостинг і сертифікування клієнта надається хмарним сервісом *Heroku*. Детальніший перелік бібліотек, використаних у розробленні клієнтської частини вебзастосунку, наведено в табл. 8.

Таблиця 8. Детальний перелік використаних бібліотек клієнтської частини вебзастосунку

Назва	Опис бібліотеки
<i>React-router</i>	Бібліотека, що допомагає переходити між сторінками на клієнтській частині та забезпечує безпечний роутинг.
<i>Axios</i>	Бібліотека, що дає змогу клієнтській частині робити запити на сервер і додавати всю необхідну інформацію до цих запитів.
<i>Redux</i>	Бібліотека, що забезпечує клієнтську частину централізованим сховищем даних. Від цієї технології унаслідуються низка інших допоміжних технологій.
<i>Redux-thunk</i>	Бібліотека, що допомагає клієнтській частині працювати із запитами на сервер.
<i>Redux-form</i>	Бібліотека, що допомагає клієнтській частині працювати з формами та перевіряти валідність інформації, яка прийшла на цю форму.
<i>material-ui</i>	Бібліотека для полегшення роботи з візуальною частиною клієнтської сторони.
<i>Js-cookie</i>	Бібліотека для роботи з <i>Cookie</i> -файлами на клієнтській частині.

Автентифікація застосунку буде реалізована двома способами:

- *JWT*-токен автентифікація для користувачів, які не застосовують сервіс *Facebook*;
- автентифікація, що використовує стандарт *OAuth 2.0* та сервіс *Facebook*.

Реалізація *JWT*-токен автентифікації

Для реалізації *JWT*-токен автентифікації в прикладній програмі застосована стратегія, що передбачає використання *Access/Refresh*-токенів. Для ідентифікації користувача застосовується *browser fingerprints*, що дає змогу відстежити другий браузер, з якого зроблено запит на сервер.

Після відправлення даних користувача (*e-mail*, логін, пароль, *browser fingerprint*) на сервер, він реєструє особу та додає цю інформацію в базу даних *PostgreSQL*. Усі паролі в базі даних *PostgreSQL* зберігаються в ґешованому вигляді з додаванням псевдовипадкових чисел для цієї реалізації застосунку. Це зроблено для того, щоб запобігти викраденню паролів користувачів, якщо базу даних буде скомпрометовано зловмисником. Після реєстрації користувач може ввести свої дані знову та пройти автентифікацію для подальшої авторизації на сайті.

Автентифікація до сайту відбувається таким чином, що сервер порівнює інформацію, надану користувачем. Якщо особа була знайдена в базі даних, то їй будуть видані *Access/Refresh*-токени, які вона використовуватиме для доступу до захищених *API* кінцевих точок. Для запобігання фальсифікації нових *Access*-токенів *Refresh*-токен додатково порівнює *fingerprints* браузера, та, якщо дані збігаються, видає новий *Access*-токен. В іншому разі *Refresh*-токен знищується, внаслідок чого ініціюється повторна автентифікація.

Реалізація автентифікації *OAuth 2.0*

Окрім звичайної автентифікації в застосунку також реалізовано автентифікацію за стандартом *OAuth 2.0*. На рис. 1 подано схематичний вигляд автентифікації *OAuth 2.0* у цьому застосунку.



Рис. 1. Схема *OAuth 2.0* у реалізації застосунку

У цій реалізації стратегія автентифікації дозволяє користувачу зайти на сайт від імені *Facebook*. Клієнт, який автентифікується через

Facebook, довіряє доступ до частини своїх даних. Сервер отримує доступ до сервісу *Facebook* з відомостями користувача та надає повне право

особі, яка пройшла автентифікацію через *Facebook*, на доступ та використання захищеної інформації із захищених *API* кінцевих точок.

Процес автентифікації починається на клієнтській частині, коли особа за допомогою *OAuth* надає свої дані від *Facebook*-акаунта. Це досягається за допомогою спливаючого вікна, яке подане сервісом *Facebook*. Передача даних у цьому вікні відбувається за протоколом *HTTPS*, тому можливість крадіжки інформації у процесі відправлення мінімальна. Після надання дозволу клієнт отримує токен, що буде відправлений до сервера. Після відправлення сервер обробляє токен і передає його назад до сервісу *Facebook* для обміну на дані клієнта, який відправив цей токен.

Список даних, що приходять із *Facebook*, користувач може налаштувати. Після того, як особа підтвердила список даних, сервер зберігає відомості нового користувача (*browser fingerprints*, *facebook refresh token*, *facebook id*) в окрему колекцію в базі даних, яка призначена спеціально для тих, хто автентифікувався за допомогою *Facebook*.

Після збереження особи в базі даних сервер відправляє їх *Refresh*- та *Access*-токени, згенеровані сервісом *Facebook*, та інформацію профіля з *Facebook*. Під час наступного входу сервер зможе запросити ці відомості з бази даних та перевірити достовірність користувача.

Аналіз ефективності запропонованих методів автентифікації

Для визначення якості реалізованих методів автентифікації вебзастосунку було проведено його якісне оцінювання в процесі реалізації автентифікації за допомогою *JWT Access/Refresh*-токенів та *OAuth 2.0* з використанням *browser fingerprints*. У цьому разі вебзастосунок та функції захисту було налаштовано, як вказано вище. Було оцінено ризики атак і вразливостей розробленої вебпрограми на основі методології *OWASP* і методу експертного оцінювання [25] з упровадженими підходами автентифікації *JWT Refresh*- та *Access*-токенів і *OAuth 2.0*. Результати оцінювання наведені в табл. 9.

Таблиця 9. Якісна оцінка ризику вебзастосунку з реалізацією функцій безпеки

Назва ризику	Тип вразливості	Збиток	Вірогідність виникнення		Результуючий ризик	
			<i>JWT</i>	<i>OAuth</i>	<i>JWT</i>	<i>OAuth</i>
Відправлення шкідливого коду на сервер з клієнта через незахищені поля введення	<i>SQL injection</i>	низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Отримання та оброблення сервером шкідливого коду	<i>SQL injection</i>	низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Злам пароллю	порушення автентифікації	низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Викрадення токена сесії	порушення автентифікації	середній	середня	низька	середній	низький
Розкриття паролів у процесі отримання несанкційного доступу до бази даних	розкриття конфіденційної інформації	низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Викрадення конфіденційної інформації під час перехоплення трафіку	розкриття конфіденційної інформації	дуже низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Отримання несанкційного доступу до облікового запису адміністратора	порушення контролю доступу	середній	дуже низька	низька	низький	низький
Введення шкідливого коду в клієнтську частину застосунку	<i>XSS</i>	дуже низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Вразливість відправлення конфіденційних даних через вебсайт зловмисника	<i>CSRF</i>	низький	дуже низька	дуже низька	дуже низький	дуже низький
Невчасне знаходження вразливостей у системі	недостатнє логування та моніторинг	низький	середня	середня	середній	середній

Для кількісного оцінювання ризику результуючому ризику надано значення від 1 до 5, де дуже низькому ризику відповідає значення 1, низькому – 2, середньому – 3, високому – 4, дуже високому – 5. Максимальне значення ризику дорівнює 55, а мінімальне – 11. Згідно з цим значення результуючого ризику для автентифікації на основі *JWT Refresh*- та *Access*-токенів дорівнює 15, а для *OAuth 2.0* – 14 відповідно, що є досить низьким значенням. Як можна побачити з табл. 9, два пункти мають середній ступінь ризику – це невчасне знаходження вразливостей та викрадення токена сесії. Щодо невчасного знаходження вразливостей, то це залежить від людського фактора. Яка б надійна не була система логування, людина все одно може не побачити загрози, що вже була записана в лог. Щодо вразливості викрадення токена сесії: оскільки роль сесійних токенів відіграють *Cookie* з *JWT*, вони все ще можуть бути викрадені через шкідливе програмне забезпечення (ПЗ) *Stealer*. У цьому разі крадіжка може бути проведена напряду з файлової системи жертви внаслідок потрапляння ПЗ *Stealer* до комп'ютера жертви, а це залежить від його захищеності. Отже, використання *OAuth 2.0* разом із *browser fingerprints* є більш безпечним, ніж у разі автентифікації з *JWT Refresh*- та *Access*-токенами, але різниця в ризику є мінімальною, тож можна використовувати будь-який із реалізованих протоколів.

Висновки

У роботі розв'язано завдання створення вебзастосунок з безпечною автентифікацією. Для цього проаналізовано найбільш відомі методи автентифікації до вебзастосунків: *Hypertext Transfer Protocol Cookie sessions*; *JWT*-токени; стандарт *OAuth 2.0*; *OpenID*; *SAML*. Установлено, що кожен із цих методів автентифікації має недоліки, а це означає наявність ризиків у процесі їх використання та необхідність налаштувань зазначених методів під час їх програмної реалізації. Створено стандартний вебзастосунок електронного

Список літератури

1. Радівілова Т.А., Кіріченко Л.О., Тавалбех М.Х., Ільков А.А. Виявлення аномалій в телекомунікаційному трафіку статистичними методами. *Електронне фахове наукове видання "Кібербезпека: освіта, наука, техніка"*. 2021. № 3(11). С.183–194. DOI: 10.28925/2663-4023.2021.11.183194

магазину на основі конструктора вебпрограм *shopify* з автентифікацією на основі *Hypertext Transfer Protocol Cookie session*. Проаналізовано ризики вразливостей і атак на цей вебзастосунок, який показав, що ризики реалізації вразливостей і атак на програму є дуже високими, з чого випливає необхідність удосконалення автентифікації, налаштувань та функцій безпеки вебзастосунку. З огляду на аналіз ризиків вразливостей і атак створеного стандартного вебзастосунку, переваги та недоліки методів автентифікації, було вдосконалено вебпрограму: методи автентифікації, налаштування застосунку, функції безпеки. Для автентифікації обрано застосування комбінації *JWT Access/Refresh*-токена з використанням *browser fingerprints* та *OAuth 2.0* із делегуванням автентифікації на сервіс *Facebook*. Проаналізовано ризики вразливостей і атак на цей вебзастосунок, який показав, що ризик реалізації вразливостей і атак на вдосконалену програму є дуже низьким. Показано, що одним із найбільш ефективних методів забезпечення безпеки даних користувача вебзастосунку виявилось використання комбінації *JWT Access/Refresh*-токена разом із *browser fingerprints*. Другим безпечним методом автентифікації, який було реалізовано у вебзастосунку, є метод автентифікації *OAuth 2.0* із делегуванням автентифікації на сервіс *Facebook*. Налаштування цього методу показало, що за умови його використання ризик реалізації вразливостей і атак на вебзастосунок є дуже низьким. Зазначено, що такі методи автентифікації можна скомпрометувати тільки під час першого посилання клієнтом початкової інформації з *browser fingerprints*, але ймовірність цього дуже незначна, оскільки вся інформація завжди передається за *HTTPS* безпечним з'єднанням.

Результати роботи доцільно використовувати для запровадження автентифікації до вебзастосунків від маленького до середнього розмірів.

Надалі необхідно вдосконалити рівень захисту вебзастосунку й автентифікації, а також підходити щодо оцінювання якості розробленої вебпрограми.

2. Radivilova T. et al. Analysis of Approaches of Monitoring, Intrusion Detection and Identification of Network Attacks. *Proceedings of 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 631–634. DOI: 10.1109/PICST54195.2021.9772226
3. Radivilova T. et al. The Complex Method of Intrusion Detection Based on Anomaly Detection and Misuse Detection. *Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine. 2020. P. 133–137. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125051
4. Радівілова Т.А. та ін. Балансування самоподібного трафіку в мережних системах виявлення вторгнень. *Електронне фахове наукове видання "Кібербезпека: освіта, наука, техніка"*. 2020. № 3(7). С. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.7.1730>
5. Пшеничних С.В., Добринін І.С., Ключкова Д.Ю. Математична модель оптимального вибору засобів захисту інформації при проектуванні комплексної системи захисту на об'єкті інформатизації. *Електронне наукове фахове видання – журнал "Проблеми телекомунікацій"*. 2023. № 1(32). С. 45–58. URL: https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2023/12/123_Pshenychnyh_security_.pdf
6. Добринін І.С., Борова М.П. Оптимізація вибору варіанту побудови системи захисту інформації від атак при антагоністичній грі. *Системи озброєння і військова техніка*. 2018. № 2 (54). С. 89–93. DOI: 10.30748/soivt.2018.54.12
7. Ardi C., Calder M. The Prevalence of Single Sign-On on the Web: Towards the Next Generation of Web Content Measurement. *Proceedings of the 2023 ACM on Internet Measurement Conference*. 2023. DOI: 10.1145/3618257.3624841
8. Shaikh N., Kasat K., Jadhav S. Secured Authentication by Single Sign On (SSO): A Big Picture. *Proceedings of the 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*. 2022. P. 951–955. DOI: 10.1109/ICCCIS56430.2022.10037708
9. Schmitz G. Privacy-preserving Web single sign-on: Formal security analysis and design. *It-Information Technology*. 2022. № 64.1-2. P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1515/itit-2022-0003>
10. Sharma S., Jevitha K. Security Analysis of OAuth 2.0 Implementation. *Proceedings of the 2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT*, Kuala Lumpur, Malaysia. 2023. P. 1–8. DOI: 10.1109/i-PACT58649.2023.10434479
11. Singh J., Chaudhary N. OAuth 2.0: Architectural design augmentation for mitigation of common security vulnerabilities. *Journal of Information Security and Applications*. 2022. № 65. Article 103091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2021.103091>
12. Al-Husari F. Designating a Leader Browser Tab to Perform Refreshing of Access Token in OAuth 2.0. *Proceedings of the 2023 11th International Scientific Conference on Computer Science, COMSCI 2023*, Sozopol, Bulgaria. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/COMSCI59259.2023.10315906
13. Shevchuk D., Harasymchuk O., Partyka A., Korshun N. Designing Secured Services for Authentication, Authorization, and Accounting of Users. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023 Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II, CPITS-II 2023, Kyiv. 2023. №3550. P. 217–225. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3550/short4.pdf>
14. Park J., Kim J., Park M., Jung S. A. Study of OAuth 2.0 Risk Notification and Token Revocation from Resource Server. In: Kim, Hw., Choi, D. (eds) *Information Security Applications. WISA 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 9503. Springer, Cham. 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31875-2_23
15. Shaikh N., Kasat K. and Jadhav S. Secured Authentication by Single Sign On (SSO): A Big Picture. *Proceedings of the 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, Greater Noida, India. 2022. P. 951–955. DOI: 10.1109/ICCCIS56430.2022.10037708
16. Al Shabi M., Rashid R. M. Analyzing Privacy Implications and Security Vulnerabilities in Single Sign-On Systems: A Case Study on OpenID Connect. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*. 2024. №15.4. DOI: 10.14569/IJACSA.2024.0150465
17. Mansur E.S., Rahmatulloh A., Shofa R., Darmawan I. AMAN: Token-based Authentication to Improved Single Sign-On Security Between Systems. *Proceedings of the 2023 International Conference on Advancement in Data Science, E-learning and Information System (ICADEIS)*. 2023. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICADEIS58666.2023.10270904
19. Grassi, P.A. et al. NIST SP 800-63B. Digital identity guidelines: Authentication and lifecycle management. *NIST Special Publication (SP)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-63b>
20. Sambit K.D. *Ultimate Web Authentication Handbook*. Orange Education Pvt Limited, 2023. 340 p. URL: <https://github.com/OrangeAVA/Ultimate-Web-Authentication-Handbook>
21. RFC 7519. JSON Web Token. 2015. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7519> (дата звернення: 05.08.2024).
22. Alsmadi I. et al. *Practical Information Security. A Competency-Based Education Course*. Springer International Publishing, 2018. 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72119-4>
23. RFC 6749. OAuth 2.0 Refresh Token. 2020. URL: <https://oauth.net/2/grant-types/refresh-token> (дата звернення: 01.08.2024).

24. 10 Best E-Commerce Website Builders Compared in 2024. 2024. URL: <https://www.websiteplanet.com/blog/best-website-builders-ecommerce-websites/> (дата звернення: 15.07.2024).
25. Single page apps in depth. 2013. URL: <http://singlepageappbook.com/goal.html> (дата звернення: 03.08.2024).
26. Добринін І. С., Мальцева Н. О. Вдосконалення методики факторного аналізу інформаційних ризиків. *Системи обробки інформації*. 2017. № 3(149). С. 146–150. DOI: 10.30748/soi.2017.149.29

References

1. Radivilova, T.A., Kirichenko, L.O., Tavalbeh, M.H., Ilkov, A.A. (2021), "Detection of Anomalies in Telecommunication Traffic by Statistical Methods" ["Vvyavlennya anomalii v telekomunikatsionomu trafiku statystychnymy metodamy"], *Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: Education, Science, Technology"*, № 3(11), P. 183–194. DOI: 10.28925/2663-4023.2021.11.183194
2. Radivilova, T. at al. (2021), "Analysis of Approaches of Monitoring, Intrusion Detection and Identification of Network Attacks", *Proceedings of 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, P. 631-634. DOI: 10.1109/PICST54195.2021.9772226
3. Radivilova, T. at al. (2020), "The Complex Method of Intrusion Detection Based on Anomaly Detection and Misuse Detection", *Proceedings of 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine, P. 133–137. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125051
4. Radivilova, T.A. at al. (2020), "Balancing self-similar traffic in network intrusion detection systems" ["Balansuvannya samopodibnoho trafiku v merezhnykh systemakh vvyavlennya vtornhen"], *Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology"*, №3 (7), C. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2020.7.1730>
5. Pshenychnych, S.V., Dobrynin, I.S., Klochkova, D.Yu. (2023), "Mathematical model of the optimal choice of means of information protection when designing a complex system of protection at the object of informatization" ["Matematychna model' optimal'noho vyboru zasobiv zakhystu informatsiyi pry proektuvanni kompleksnoyi systemy zakhystu na ob'yekti informatyzatsiyi"], *Electronic scientific publication – the journal "Telecommunications Problems"*, № 1(32), C. 45–58. available at: https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2023/12/123_Pshenychnyh_security_.pdf
6. Dobrynin, I.S., Borova, M.P. (2018), "Optimization of the choice of the option of building an information protection system against attacks during an antagonistic game" ["Optymizatsiya vyboru variantu pobudovy systemy zakhystu informatsiyi vid atak pry antahonistychniy hri"], *Weapon systems and military equipment*, № 2 (54), C. 89–93. DOI: 10.30748/soivt.2018.54.12
7. Ardi, C., Calder, M. (2023), "The Prevalence of Single Sign-On on the Web: Towards the Next Generation of Web Content Measurement", *Proceedings of the 2023 ACM on Internet Measurement Conference*. DOI: 10.1145/3618257.3624841
8. Shaikh, N., Kasat, K., Jadhav, S. (2022), "Secured Authentication by Single Sign On (SSO): A Big Picture", *Proceedings of the 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, P. 951–955. DOI: 10.1109/ICCCIS56430.2022.10037708
9. Schmitz, G. (2022), "Privacy-preserving Web single sign-on: Formal security analysis and design", *It-Information Technology*, №64.1-2, P. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1515/itit-2022-0003>
10. Sharma, S., Jevitha, K. (2023), "Security Analysis of Oauth 2.0 Implementation", *Proceedings of the 2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT*, Kuala Lumpur, Malaysia, P. 1–8. DOI: 10.1109/i-PACT58649.2023.10434479
11. Singh, J., Chaudhary, N. (2022), "Oauth 2.0: Architectural design augmentation for mitigation of common security vulnerabilities", *Journal of Information Security and Applications*, №65, Article 103091. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2021.103091>
12. Al-Husari, F. (2023), "Designating a Leader Browser Tab to Perform Refreshing of Access Token in Oauth 2.0", *Proceedings of the 2023 11th International Scientific Conference on Computer Science, COMSCI 2023*, Sozopol, Bulgaria, P. 1–4. DOI: 10.1109/COMSCI59259.2023.10315906
13. Shevchuk, D., Harasymchuk, O., Partyka, A., Korshun, N. (2023), "Designing Secured Services for Authentication, Authorization, and Accounting of Users", *CEUR Workshop Proceedings, 2023 Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II, CPITS-II 2023*, Kyiv, №3550, P. 217–225. available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3550/short4.pdf>
14. Park, J., Kim, J., Park, M., Jung, S. (2016), "A Study of Oauth 2.0 Risk Notification and Token Revocation from Resource Server". In: Kim, Hw., Choi, D. (eds) *Information Security Applications, WISA 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 9503, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-31875-2_23

15. Shaikh, N., Kasat, K. Jadhav, S. (2022), "Secured Authentication by Single Sign On (SSO): A Big Picture", *Proceedings of the 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, Greater Noida, India, P. 951–955. DOI: 10.1109/ICCCIS56430.2022.10037708
16. Al Shabi, M., Rashid, R. M. (2024), "Analyzing Privacy Implications and Security Vulnerabilities in Single Sign-On Systems: A Case Study on OpenID Connect", *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, №15.4. DOI: 10.14569/IJACSA.2024.0150465
17. Mansur, E.S., Rahmatulloh, A., Shofa, R., Darmawan, I. (2023), "AMAN: Token-based Authentication to Improved Single Sign-On Security Between Systems", *Proceedings of the 2023 International Conference on Advancement in Data Science, E-learning and Information System (ICADEIS)*, P. 1–6. DOI: 10.1109/ICADEIS58666.2023.10270904
18. Grassi, P.A. et al. (2020), "NIST SP 800-63B. Digital identity guidelines: Authentication and lifecycle management". *NIST Special Publication (SP)*. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-63b>
19. Sambit, K.D. (2023), "Ultimate Web Authentication Handbook", Orange Education Pvt Limited, 340 p. available at: <https://github.com/OrangeAVA/Ultimate-Web-Authentication-Handbook>.
20. "RFC 7519. JSON Web Token", available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc7519> (last accessed: 05.08.2024).
21. Alsmadi, I., et al. (2018), "Practical Information Security". *A Competency-Based Education Course*; Springer International Publishing, 317 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72119-4>
22. "RFC 6749. OAuth 2.0 Refresh Token", available at: <https://oauth.net/2/grant-types/refresh-token> (last accessed: 01.08.2024).
23. "10 Best E-Commerce Website Builders Compared in 2024", available at: <https://www.websiteplanet.com/blog/best-website-builders-ecommerce-websites/> (last accessed: 15.07.2024).
24. "Single page apps in depth", available at: <http://singlepageappbook.com/goal.html> (last accessed: 03.08.2024).
25. Dobrynin I. S., Maltseva N. O. (2017), "Improving the method of factor analysis of information risks" ["Vdoskonalennya metodyky faktornoho analizu informatsiynykh ryzykiv"], *Information processing systems*, №3(149), C. 146–150. DOI: 10.30748/soi.2017.149.29

Надійшла (Received) 21.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Радівілова Тамара Анатоліївна – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, Харків, Україна; e-mail: tamara.radivilova@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5975-0269>

Кіриченко Людмила Олегівна – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри штучного інтелекту, Харків, Україна; e-mail: ludmila.kirichenko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-7993>

Пантелєєв Вадим Олегович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського, Харків, Україна; e-mail: vadym.pantelieiev@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7824-8782>

Мазепа Артем Дмитрович – компанія *Geniox*, фулстек-розробник, Дніпро, Україна; e-mail: yertom500@gmail.com; ORCID ID: 0009-0002-9977-5932

Білодід Володимир Григорович – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, науковий співробітник, Харків, Україна; e-mail: vibos111@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8976-2310>

Radivilova Tamara – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the V.V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Kirichenko Lyudmyla – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Artificial Intelligence, Kharkiv, Ukraine.

Pantelieiev Vadym – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student at the V.V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Mazepa Artem – Geniox company, Full Stack Developer, Dnipro, Ukraine.

Bilodid Volodymyr – Kharkiv National University of the Air Force "Chief Marshal of Aviation Ivan Kozhedub", Researcher, Kharkiv, Ukraine.

ANALYSIS OF AUTHENTICATION METHODS FOR FULL-STACK APPLICATIONS AND IMPLEMENTATION OF A WEB APPLICATION WITH AN INTEGRATED AUTHENTICATION SYSTEM

The **subject** of research is methods and techniques for secure user authentication in web applications. The **goal** of the work is to analyse authentication methods and implement a web application with an authentication system integrating JWT tokens and the OAuth v2.0 standard. The article solves the **tasks** of analysis of the main protocols and methods of user authentication in web applications, implementation of authentication based on the OAuth 2.0 standard and JWT access/refresh token, and analysis of the risks of vulnerabilities and attacks for the implemented web applications. **Methods** used: comparison, empirical analysis, calculation methods. The next **results** have been obtained: analysed the protocols and methods of user authentication in web applications; selected authentication methods of JWT token and OAuth v2.0 standard for building modern web applications; created a web application based on the selected authentication methods in web applications; analysed the risks of vulnerabilities and attacks in web applications. **Conclusions:** The most well-known authentication methods for web applications are analyzed. It is established that most modern authentication methods have many disadvantages, which leads to increased risks when using these authentication methods. It is shown that one of the most reliable methods of web application user data security is the use of a combination of JWT Access/Refresh token and browser fingerprints. The implementation, configuration, and analysis of this methodology have shown that this combination provides the most reliable prevention of token theft and use from another computer. OAuth 2.0 authentication was also implemented. The study found that delegating authentication to services such as Facebook or Google can provide a low risk of attacks and vulnerabilities for a web application. It is noted that authentication using OAuth 2.0 can be compromised only at the beginning of the connection between the client and the server, or rather when the client first sends initial information from the browser fingerprints. This information is sent over the secure HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) protocol, so the risk of compromising OAuth 2.0 authentication is low.

Keywords: authentication; integrated authentication system; OAuth; JWT; token; web application.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Радівілова Т. А., Кіріченко Л. О., Пантелєєв В. О., Мазєпа А. Д., Білодід В. Г. Аналіз методів автентифікації для вебзастосунків та реалізація вебзастосунку з інтегрованою системою автентифікації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 76–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.076>

Radivilova, T., Kirichenko, L., Pantelieiev, V., Mazepa, A., Bilodid, V. (2024), "Analysis of authentication methods for full-stack applications and implementation of a web application with an integrated authentication system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 76–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.076>

Д. ТЕРЕНИК, В. ХАРЧЕНКО

ВИБІР СТРАТЕГІЙ РОЗГОРТАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЮ БПЛА ДЛЯ ПІДТРИМКИ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ РУЙНУВАНЬ

Предметом дослідження в статті є система комунікаційних мереж БПЛА (літальних мереж, ЛМ), що використовують технологію *LiFi* для передачі інформації від джерела до приймача в умовах фізичних перешкод і кіберзагроз, а також стратегії розгортання та забезпечення надійності (СРЗН) ЛМ. **Мета роботи** – розроблення критеріїв і алгоритмів вибору СРЗН ЛМ, що забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності за умови заданих обмежень. У статті розв'язуються конкретні **завдання**: систематизація стратегій розгортання та забезпечення надійності літальної мережі; формулювання принципів і розроблення алгоритму вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ; надання рекомендацій щодо вибору оптимальних стратегій розгортання та забезпечення надійності літальної мережі. Упроваджено такі **методи**: системний аналіз для вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності; теорія надійності та ефективності системи. **Досягнуті результати**: розширено класифікатор стратегій розгортання ЛМ завдяки додатковим ознакам ремонту й обслуговування, а також наявності кібератак; сформульовано критерії вибору стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ; розроблено алгоритм вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ; проаналізовано та наведено приклад застосування розроблених алгоритмів для ілюстрації покрокової процедури вибору стратегії, що супроводжується розрахунками показників надійності. **Висновки**: запропоновані множини, критерії та алгоритм вибору стратегій розгортання та забезпечення надійності комунікаційних мереж БПЛА дають змогу обґрунтувати сукупність параметрів і спланувати реалізацію оптимальної (за визначеним критерієм) політики впровадження автоматичної системи підтримки комунікацій на об'єктах критичної інфраструктури в умовах руйнувань та кібервпливів, а також підвищити ефективність (мінімізувати вартість) застосування літальних мереж.

Ключові слова: БПЛА; *LiFi*; літальні мережі; алгоритми вибору; надійність; ефективність стратегії.

1 Вступ

1.1 Мотивація та огляд публікацій

Забезпечення надійних комунікацій в умовах руйнувань є критично важливим, особливо в разі природних катастроф, техногенних аварій та воєнних конфліктів. Відсутність комунікацій у таких ситуаціях може призвести до втрат людського життя та значних матеріальних ресурсів. Літальні мережі, що містять у своєму складі безпілотні літальні апарати (БПЛА) та підтримуються відповідною інфраструктурою, можуть стати ефективним рішенням для швидкого надання або відновлення комунікацій за критичних умов завдяки мобільності, гнучкості та можливості розгортання в найкоротші терміни.

Застосування БПЛА для забезпечення комунікацій в екстремальних ситуаціях привернуло увагу наукової спільноти. Наприклад, у дослідженні [1] розглянуто ключові характеристики та технології безпілотних ад-гок-мереж, що доводить їх потенціал у розв'язанні завдань з комунікацій. Автори роботи [2] проаналізували можливості використання безпілотних

літальних апаратів у бездротових мережах для забезпечення комунікацій у складних умовах.

Проте існує значна кількість технічних викликів, які необхідно подолати для забезпечення надійності та стійкості (резильєнтності) таких мереж [3]. До основних проблем належать оптимізація маршрутів БПЛА та взаємодія дронів у рої [4], забезпечення безперебійного енергопостачання [5], мінімізація затримок у передачі даних і захист мереж від зовнішніх загроз. У дослідженні [6] наголошується на важливості оптимізації ресурсів у розподілених системах із використанням БПЛА, що є одним із ключових аспектів для забезпечення надійності таких мереж. Важливим є завдання визначення раціонального розміру флотилії БПЛА з огляду на надійність літальних апаратів та необхідну якість контролю ситуації в надзвичайних ситуаціях, що розглянуто в роботі [7]. У статтях [8–10] пропонуються методи, що дають змогу БПЛА автономно навігувати в невідомих раніше внутрішніх коридорних приміщеннях без використання GPS, із застосуванням монокулярної камери, лазерних дальномірів або простих камер.

Окрім технічних викликів, важливим аспектом також є економічна ефективність використання БпЛА для забезпечення комунікацій. У дослідженнях [11, 12] доведено, що правильне планування, розгортання та управління ресурсами може значно зменшити витрати та підвищити ефективність роботи таких мереж. Окремо варто згадати про виклики кібербезпеки [13], що супроводжують використання БпЛА та літальних мереж в умовах руйнувань та інформаційних впливів. Безпілотні літальні апарати, особливо в разі їх масового застосування, стають мішенню для кібератак, що може призвести до втрати контролю або до компрометації переданої інформації. У праці [14] наголошується на важливості розроблення методів захисту від кібератак для забезпечення безпеки та надійності операцій із використанням БпЛА, що може сприяти стабільній роботі літальних мереж у будь-якій ситуації.

Отже, важливим є визначення принципів і алгоритмів вибору стратегій, які забезпечують значення показників надійності відповідно до вимог і підвищують ефективність системи за умови заданих обмежень. Це дасть змогу ідентифікувати найкращі стратегії для забезпечення стабільної та надійної роботи літальних мереж у складних та мінливих обставинах. Такий підхід є важливим для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж у разі руйнувань.

Ключовими роботами, на які спираються автори цього дослідження, є статті [15–17], у яких описано стратегії розгортання та моделі забезпечення надійності літальних мереж під час забезпечення *LiFi*-комунікацій в умовах руйнувань. У роботі [18] систематизовано множину стратегій, надано їх класифікацію та описано приклади таких стратегій. Тому природним є наступний крок: обґрунтування критеріїв і розроблення алгоритмів вибору стратегій з множини можливих варіантів з огляду на вимоги та обмеження системи, яка об'єднує власне БпЛА і відповідний комплекс керування та обслуговування.

1.2 Мета й завдання дослідження

Узагальнена модель досліджуваної системи (рис. 1) містить у своєму складі рій літальних БпЛА, що забезпечують *LiFi*-комунікацію для передачі даних від джерела А (вимірювальні датчики, наприклад, для контролю рівня радіації в зоні реактора)

до приймача в точці В (отримувач інформації, наприклад, кризовий центр, де вона збирається та аналізується). Рій комунікаційних БпЛА розташовується в точці С (депо, де розміщено апарати, здійснюється керування мережею та розташовано вузол профілактичного обслуговування й ремонту). У просторі подальшого розгортання БпЛА є різноманітні, хаотично розташовані фізичні перешкоди, які необхідно оминати, щоб забезпечити пряму видимість між сусідніми БпЛА. Крім цього, на роботу БпЛА впливають фізичні фактори та кіберзагрози. Отже, на відміну від моделі, запропонованої у роботі [18], досліджувана модель доповнена вузлом ремонту та захисту від кібервпливів.

Мета статті – розроблення критеріїв і алгоритмів вибору стратегій, що забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності системи за умови заданих обмежень. Множина стратегій доповнена з огляду на додаткові класифікаційні ознаки. Запропонований підхід є важливим для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж у разі руйнувань, що забезпечить за певних умов підвищення ефективності та безпеки рятувальних операцій та інших критичних завдань.

Щоб досягти окресленої мети, необхідно виконати такі завдання:

- доповнити множину стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ;
- сформулювати принципи та розробити алгоритм вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ;
- проаналізувати стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ за сформульованими принципами й алгоритмами;
- надати рекомендації щодо вибору оптимальних стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ.

Стаття має чітку структуру. Другий розділ присвячений уточненню класифікації стратегій з огляду на додаткові ознаки, а також її опису й аналізу. У третьому розділі подані критерії та алгоритм вибору стратегій, а також стисло наведено інформаційну інфраструктуру системи. Четвертий розділ містить приклади застосування алгоритмів вибору стратегій. Нарешті, у п'ятому розділі підбито підсумки та окреслено подальші напрями досліджень.

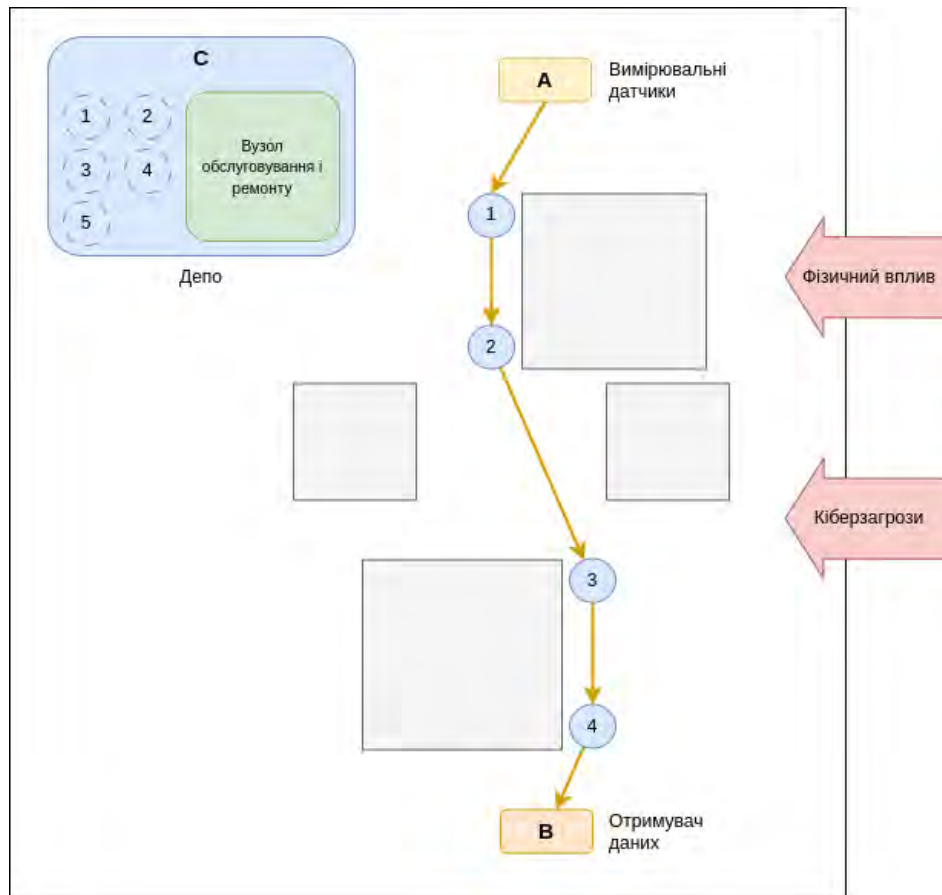


Рис. 1. Узагальнена модель досліджуваної системи ЛМ

2 Формування множини стратегій

На основі аналізу предметної галузі [15], спираючись на результати [18], де визначено шість ознак для класифікації стратегій розгортання мереж із використанням БпЛА, додамо ознаку профілактики й ремонту. Розмістимо ознаки за принципом зростання важливості та згрупуємо їх за близькістю. Надамо кожному значенню ознаки певний код, що застосовуватиметься для ідентифікації стратегії розгортання.

$$\begin{aligned}
 & \{ \text{Можливість переривання зв'язку} \} / \\
 & \{ \text{Наявність ремонту та обслуговування} \} / \\
 & \{ \text{Резервування} \} - \{ \text{Метод резервування} \} / \\
 & \{ \text{Зміна розташування перешкод} \} - \{ \text{Спосіб доставки БпЛА} \} - \{ \text{Тип стартової точки} \}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Запропоноване кодування містить чотири блоки в такій послідовності: комунікаційні ознаки, ознаки обслуговування, надійнісні ознаки, архітектурні ознаки. За результатами аналізу класифікатора визначимо множину стратегій, що може бути сформована як декартовий добуток підмножин (сутностей) за кожною ознакою (табл. 1).

Подамо класифікацію стратегій розгортання мережі БпЛА у вигляді двох стовпчиків (рис. 2): ліворуч наведено ознаки класифікації, праворуч – сутності (варіанти стратегій). Ця структура полегшує адаптацію класифікації до нових вимог і дає змогу легко додавати ознаки або варіанти стратегій без порушення загальної логіки класифікації.

Пропонується кодування стратегії за схемою (1), що узагальнює схему, наведену в роботі [18]:

Розглянемо обмеження, пов'язані з додаванням ознаки профілактикування та ремонту. Стратегії розгортання, що не припускають переривання зв'язку, вимагають безперервної роботи мережі БпЛА без жодних збоїв. Такі стратегії передбачають, що мережа має постійно функціонувати, що унеможливило зупинення роботи БпЛА для ремонту або технічного обслуговування.

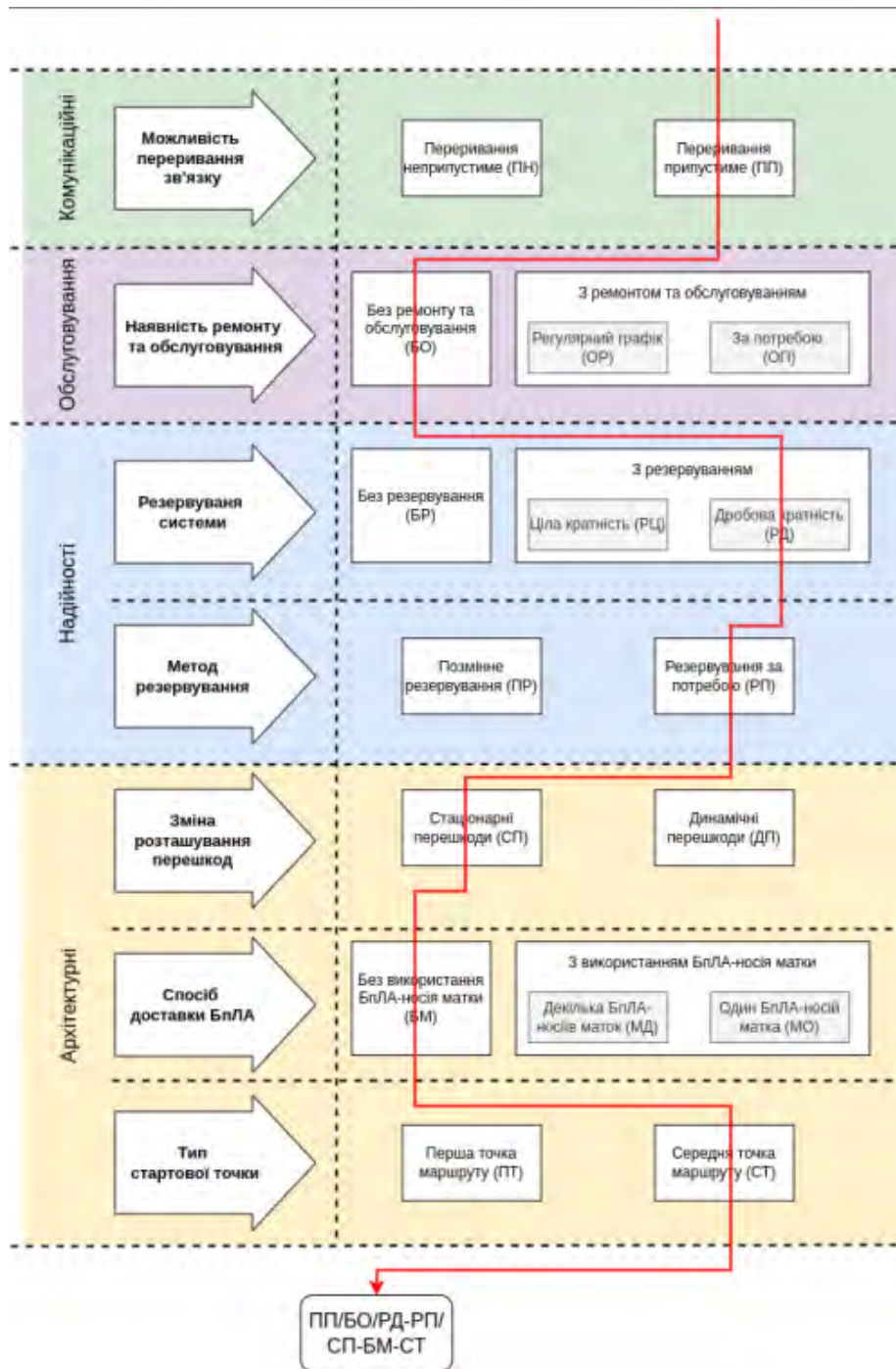


Рис. 2. Класифікатор стратегій розгортання мережі БЛЛА та приклад формування однієї з СРЗН

Таблиця 1. Множини стратегій розгортання ЛМ за групами ознак

Множина стратегій розгортання за комунікаційними ознаками	Множина стратегій розгортання за ознаками обслуговування	Множина стратегій розгортання за ознаками надійності	Множина стратегій розгортання за архітектурними ознаками
1. ПН 2. ПП	1. БО 2. ОР 3. ОП	1. БР 2. РЦ-ПР 3. РЦ-РП 4. РД-РП	1. СП-БМ-ПТ 2. СП-БМ-СТ 3. СП-МО-ПТ 4. СП-МД-СТ 5. ДП-БМ-ПТ 6. ДП-БМ-СТ 7. ДП-МО-ПТ

Стратегії розгортання, що передбачають ремонт і обслуговування, вимагають можливості зупинення окремих БпЛА для проведення технічного обслуговування або ремонту. Це означає, що під час ремонту або обслуговування мережа повинна мати додаткові ресурси для підтримки безперервності роботи. Однак стратегії без резервування не передбачають наявності додаткових БпЛА

чи компонентів, які можуть замінити несправні або ті, що потребують обслуговування. Отже, поєднання цих двох стратегій є неефективним, оскільки спричиняє простій системи під час технічного обслуговування або ремонту.

Отримаємо множину стратегій розгортання ЛМ – 104 можливі комбінації, зважаючи на всі обмеження та вилучення неефективних стратегій (табл. 2).

Таблиця 2. Фінальна множина стратегій розгортання ЛМ

Переривання неприпустиме без обслуговування (ПН/БО)	Переривання припустиме без обслуговування (ПП/БО)	Переривання припустиме та регулярне обслуговування (ПП/ОР)	Переривання припустиме та обслуговування за потреби (ПП/ОП)
1. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/БО/БР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ
2. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	2. ПП/БО/БР/СП-БМ-СТ	2. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	2. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ
3. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	3. ПП/БО/БР/СП-МО-ПТ	3. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	3. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ
4. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	4. ПП/БО/БР/СП-МД-СТ	4. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	4. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-МД-СТ
5. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/БО/БР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ
6. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/БО/БР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ
7. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/БО/БР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ
8. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	8. ПП/БО/БР/ДП-МД-СТ	8. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	8. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ
9. ПН/БО/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	9. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	9. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	9. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ
10. ПН/БО/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	10. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	10. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	10. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-БМ-СТ
11. ПН/БО/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	11. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	11. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	11. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-МО-ПТ
12. ПН/БО/РЦ-РП/СП-МД-СТ	12. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	12. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-МД-СТ	12. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-МД-СТ
13. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ
14. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	14. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	14. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	14. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ
15. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	15. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	15. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	15. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ
16. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	16. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	16. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	16. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-МД-СТ
17. ПН/БО/РД-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/БО/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/ОР/РД-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/ОП/РД-РП/СП-БМ-ПТ
18. ПН/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/БО/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/ОР/РД-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/ОП/РД-РП/СП-БМ-СТ
19. ПН/БО/РД-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/БО/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/ОР/РД-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/ОП/РД-РП/СП-МО-ПТ
20. ПН/БО/РД-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/БО/РЦ-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/ОР/РД-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/ОП/РД-РП/СП-МД-СТ
21. ПН/БО/РД-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/ОР/РД-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/ОП/РД-РП/ДП-БМ-ПТ
22. ПН/БО/РД-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/ОР/РД-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/ОП/РД-РП/ДП-БМ-СТ
23. ПН/БО/РД-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/ОР/РД-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/ОП/РД-РП/ДП-МО-ПТ
24. ПН/БО/РД-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/ОР/РД-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/ОП/РД-РП/ДП-МД-СТ
	25. ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-ПТ		
	26. ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ		
	27. ПП/БО/РД-РП/СП-МО-ПТ		
	28. ПП/БО/РД-РП/СП-МД-СТ		
	29. ПП/БО/РД-РП/ДП-БМ-ПТ		
	30. ПП/БО/РД-РП/ДП-БМ-СТ		
	31. ПП/БО/РД-РП/ДП-МО-ПТ		
	32. ПП/БО/РД-РП/ДП-МД-СТ		

3 Принципи й алгоритм вибору стратегій

3.1 Визначення критеріїв вибору

Розглянемо характеристики системи, за якими важливо оцінити та порівняти різні стратегії розгортання літальної мережі БпЛА. Це допоможе визначити найкращі стратегії, які забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності системи за умови заданих обмежень, що важливо для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж унаслідок руйнувань.

Безвідмовність: здатність системи безперервно виконувати функції комунікації протягом заданого часу. У цьому разі береться до уваги кількість БпЛА, що утворюють мережу, яка варіюється згідно з обмеженнями, що визначаються поточними умовами та вимогами. Резервування БпЛА дає змогу знизити ймовірність відмови мережі та забезпечити її безперервне функціонування із заданою безвідмовністю.

Ремонтпридатність (відновлюваність, обслуговуваність): здатність системи до відновлення працездатності після відмови або в контексті цього дослідження та роботи [15]. Це означає час

перезарядження батарей БпЛА, оскільки їх ремонт не розглядається. Перехід системи в непрацездатний стан відбувається через розрядження батарей. Важливо оптимізувати процес зарядження, щоб мінімізувати час простою та забезпечити безперервну роботу мережі.

Вразливість до зовнішніх впливів (живучість, резильєнтність): здатність системи протистояти впливу фізичних або інформаційних факторів. Вона також характеризується керованістю процесів деградації (зменшення ефективності) в умовах втрати працездатності частиною елементів системи. Різні БпЛА по-різному реагують на вплив зовнішніх чинників, а на рівні системи мають реалізовуватися процедури керованої деградації, щоб мінімізувати вплив на ефективність. Увага приділяється комплексному впливу навколишнього середовища через коефіцієнт інтенсивності відмови, який відтворює чутливість БпЛА до цих факторів. Вразливість до кіберзагроз є критичним аспектом, що впливає на живучість та резильєнтність системи. До таких загроз належать атаки на комунікаційні канали, спроби перехоплення або підроблення даних, а також спроби взяти під контроль безпосередньо БпЛА. Необхідно, щоб система мала механізми виявлення та реагування на кібератаки, що дасть змогу швидко відновити функціональність після інцидентів. Розроблення і тестування сценаріїв кібербезпеки допоможуть покращити готовність системи до можливих атак.

Оперативність розгортання: час, необхідний для повного розгортання літальної мережі з використанням БпЛА для забезпечення комунікацій між джерелами інформації та центрами прийняття рішень. Час, що витрачається на заміщення окремих апаратів або їх груп без неприпустимої перерви комунікації, має бути окремим показником, що впливає на ефективність системи загалом.

Ефективність: комплексна характеристика, що визначається тим, як система забезпечує досягнення ключових цілей (якісний, тривалий і безперервний зв'язок), зважаючи на витрати. Ця характеристика дає змогу оцінити економічну доцільність вибору тієї чи іншої стратегії розгортання та підтримки мережі, беручи до уваги витрати на закупівлю, обслуговування та експлуатацію БпЛА, а також очікуваний результат у вигляді якісної та надійної роботи мережі.

Надамо показники, за якими доцільно вимірювати перелічені характеристики.

1. **Імовірність безвідмовної роботи за визначений час, $P(tx)$:** імовірність, що система буде функціонувати безвідмовно протягом заданого часу tx . Це ключовий показник безвідмовності (надійності), що визначає, наскільки довго система може працювати без відмов згідно з вимогами.

2. **Середній час відновлення (MTTR – Mean Time To Repair):** середній час, необхідний для відновлення працездатності системи після відмови, що передбачає час на заміну або зарядження батарей БпЛА.

3. **Інтенсивності відмов БпЛА в номінальних умовах λ_0 і під впливом зовнішніх факторів λ_e ,** пов'язаних між собою, у найпростішому варіанті добутком коефіцієнтів, що зважають на фізичні та інформаційні впливи.

4. **Час розгортання (T):** час підготовки (необхідний для підготовки системи до розгортання), час запуску (необхідний для фізичного розгортання та запуску системи), час налаштування (необхідний для налаштування і перевірки працездатності системи).

5. **Показник економічної ефективності (EP – Economic Performance):** відношення математичного очікування часу безвідмовної роботи з імовірністю, не нижчою від заданої (TP_{req}), до сумарної вартості системи (TC – Total Cost, де $TC = CAPEX + OPEX$, $CAPEX$ (Capital Expenditure) – витрати на обладнання; $OPEX$ (Operational Expenditure) – витрати на експлуатацію мережі, до очікуваного часу безперебійної роботи.

Визначимо, які можуть бути критерії для вибору стратегій.

- Простий критерій: використовується тільки один показник, для якого сформовано вимогу, наприклад, $P(tx) > P_{req}$. Може також задаватися вимога до максимізації або мінімізації певного показника.

- Комплексний критерій: використовується кілька показників для таких характеристик, як безвідмовність, вартість, час на заміну, для яких можуть бути встановлені окремі вимоги (обмеження).

- Критерій, коли задається цільова функція та обмеження: наприклад, мінімум вартості розв'язання задачі B_{min} (вартість всіх задіяних БпЛА + вартість обслуговування), якщо $P(tx) > P_{req}$. У цьому разі B_{min} є цільовою функцією, а $P(tx) > P_{req}$ – обмеженням.

- Критерій аналогічно до пункту 3, але з кількома обмеженнями.

• Багатокритеріальна задача (оптимізація): кілька цільових функцій і кілька обмежень.

3.2 Алгоритм вибору

Алгоритм вибору – це послідовність дій, що використовується для визначення оптимальних за заданим критерієм стратегій розгортання мережі БПЛА. За алгоритмом систематично оцінюються всі можливі варіанти й обирається найкращий за визначеним критерієм. Використання алгоритму вибору забезпечує обґрунтованість і ефективність прийнятих рішень, допомагаючи знизити ризики та підвищити надійність системи.

Запропоновано загальну послідовність вибору оптимальних стратегій розгортання ЛМ.

1. **Ініціалізація.** Збір початкових даних про розгортання літальної мережі, результати визначення умов експлуатації та доступні ресурси.

2. **Формування множини можливих стратегій.** Фільтрація непридатних комбінацій (зі списку розробленої множини стратегій) згідно з обмеженнями, зібраними в процесі ініціалізації.

3. **Визначення критеріїв вибору стратегії розгортання.** Такий вибір встановлюється насамперед замовником системи. Крім того, зважаючи на те, що застосування літальних мереж зазначеного класу орієнтоване на складні мінливі умови, складники критерію (значення обмежень, показники, які беруться до уваги) або навіть сам тип критерію можуть змінюватися.

4. **Оцінювання показників ефективності.** Виконання моделювання та симуляції функціонування системи за кожної стратегії. Розрахунок необхідних показників (надійності, швидкості розгортання, енергоспоживання, фінансових витрат тощо).

5. **Вибір оптимальної стратегії.** Оцінювання стратегій та їх вибір відповідно до визначеного критерію.

6. **Перевірка та валідація.** Тестування обраної стратегії в симуляційних умовах. Аналіз результатів і корекція стратегії за необхідності. Аналіз можливих ризиків і способів їх мінімізації.

3.3 Архітектура системи

Підтримку впровадження певного алгоритму та алгоритмів керування за допомогою розгортання та експлуатації ЛМ забезпечує ІТ-інфраструктура системи, елементами якої є:

• сервери, що обробляють значні обсяги даних у реальному часі, зокрема аналізують телеметричні

показники від БПЛА та обчислюють оптимальні маршрути;

• мережне обладнання для забезпечення зв'язку між компонентами системи;

• програмне забезпечення для моніторингу стану системи в реальному часі, а саме: виявлення відмов, моніторинг працездатності мережі та управління запасами БПЛА;

• інструменти для захисту системи від кіберзагроз;

• бази даних для зберігання та оброблення інформації; використовуються як *SQL*, так і *NoSQL* бази даних для забезпечення гнучкості та ефективності управління інформацією, зважаючи на різні вимоги до структури й оброблення даних. Подібний підхід досліджено та обґрунтовано в роботі [19];

• інтерфейси для відтворення інформації у вигляді карт, графіків та інших візуальних елементів, що полегшують аналіз та прийняття рішень.

4 Приклади вибору стратегії

Розглянемо процес розгортання рою БПЛА для утворення літальної комунікаційної *LiFi*-мережі в приміщенні з перешкодами під час аварійної ситуації на кшталт руйнування турбінної зали атомної станції чи іншої споруди. Рій комунікаційних БПЛА (що містить основні та резервні апарати) розташований у депо в точці С. Це може бути зроблено заздалегідь, і завдання розгортання та функціонування мережі розв'язується повністю в автоматичний спосіб. Депо не оснащено пунктом ремонту та обслуговування, але є резервні БПЛА. Маршрут передачі *LiFi*-сигналу (*LiFi*-маршрут) від точки А (джерело інформації) до точки В (споживач інформації), кількість БПЛА для створення мережі та їх розміщення на маршруті визначаються заздалегідь на підставі алгоритмів, описаних у роботі [15]. Використовуються однотипні БПЛА (однакові характеристики щодо автономності, швидкості, інтенсивності відмов тощо). Наявність БПЛА-матки не передбачено.

Застосуємо множину стратегій розгортання ЛМ, розроблену в розділі 2, щоб обрати стратегії, допустимі для виконання поставленого завдання.

Починаємо з ознак за зростанням важливості.

• **Можливість переривання зв'язку:** задана умовами завдання:

– Переривання припустиме (код – ПП).

• **Наявність ремонту та обслуговування:** не передбачена умовами завдання:

– Без ремонту та обслуговування (код – БО): депо не оснащено пунктом ремонту та обслуговування.

• **Резервування:** за умовами завдання використання резервних БПЛА допускається:

– З резервуванням дробової кратності (код – РД).

• **Метод резервування:** за умови "дробової кратності" позмінне резервування стає неефективним:

– Резервування за потребою (код – РП).

• **Розташування перешкод:** їх розміри, кількість і розміщення задані умовами завдання:

– Стаціонарні перешкоди (код – СП).

• **Спосіб доставки БПЛА:** заданий умовами завдання:

– Без використання БПЛА-носія матки (код – БМ).

• **Тип стартової точки:** не уточнюється, але симуляції показали, що стратегії із середньою точкою старту є більш ефективними (менший час розгортання). Крім того, якщо розглядати комплекс, що забезпечує розгортання літальної мережі, як частину штатної системи безпеки, місце розташування депо може бути визначено з огляду на цю обставину:

– Середня точка маршруту (код – СТ).

Отже, обираємо одну стратегію ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ, яка відповідає цим вимогам і висновкам (рис. 3). Вона також ілюструється відповідною траєкторією (див. рис. 2).

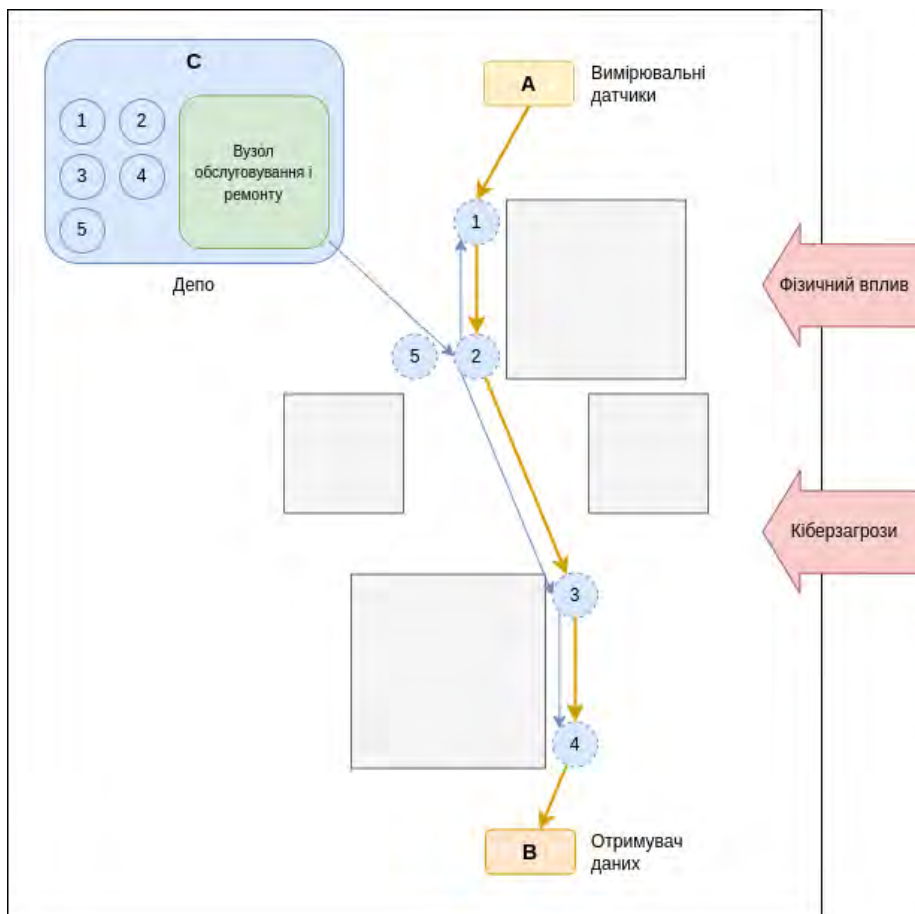


Рис. 3. Стратегія розгортання мережі ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ

Припустимо, що задані такі вимоги до розгортання комунікаційної мережі БПЛА:

• імовірність безвідмовної (безперервної) роботи має бути не нижчою від припустимого значення протягом заданого часу;

• показник економічної ефективності має бути максимальним.

Отже, критерієм вибору стратегії забезпечення надійності системи БПЛА буде критерій з використанням цільової функції з обмеженнями.

Цільова функція: показник економічної ефективності має бути максимальним, зважаючи на сумарні витрати ТС та очікуваний час безперебійної роботи (*MTBF*).

Обмеження: мережа має відповідати певному заданому рівню надійності, $P(tx) \geq P_{req}$. Припустимо, що $P_{req} = 0,9$.

Оскільки за попереднього аналізу маємо одну прийнятну стратегію (ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ), наведемо її різні варіації. Розглянемо приклади застосування цієї стратегії за умови використання різних моделей БПЛА, щоб з'ясувати, що є більш економічно ефективним: обрати більш дешеві, але менш надійні БПЛА чи обрати дорожчі та надійні.

Маємо таку загальну вхідну інформацію:

- кількість БПЛА в мережі – 5;
- час роботи (t_1) – 20 год.

Варіація 1, дорожчі БПЛА:

- ціна одного БПЛА – 2000 USD;
- інтенсивність відмов одного БПЛА (λ_1) – 0,0010 відмов на годину.

Варіація 2, дешевші БПЛА:

- ціна одного БПЛА – 1500 USD;
- інтенсивність відмов одного БПЛА (λ_2) – 0,0013 відмов на годину.

Надійність (гарантоздатність) БПЛА визначається:

– безвідмовністю технічних засобів (беруться до уваги відмови електронних компонент, двигунів, сенсорів тощо, а також коефіцієнт зовнішніх факторів);

– безвідмовністю (коректністю) вбудованого програмного забезпечення (відмови можуть бути викликані дефектами в коді, збоями в операційній системі, роботі з базою даних або програмному забезпеченні управління польотом);

– ризиками успішних кібератак (реалізацією загроз, пов'язаних із втручанням у систему керування, зломом або саботажем через мережні вразливості).

На підставі цього аналізу можемо припустити, що інтенсивність відмови одного БПЛА (λ_{UAV}) передбачає інтенсивності відмов технічних ($\lambda_{hardware}$) і програмних ($\lambda_{software}$) засобів, а також відмов унаслідок успішних кібератак (λ_{cyber}), і в разі

прийнятності припущення про незалежність відмов отримаємо формулу (2):

$$\lambda_{UAV} = \lambda_{hardware} + \lambda_{software} + \lambda_{cyber}. \quad (2)$$

Розглянемо систему з n БПЛА в мережі та m резервних БПЛА. Коли в мережі відмовляє БПЛА та його неможливо замінити (резервних БПЛА не вистачає) – система вважається непрацездатною. Імовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати, використовуючи модель ковзного резервування.

Модель ковзного резервування передбачає, що маємо основні та резервні елементи (у нашому випадку – БПЛА), які можуть толерувати відмови основних елементів способом їх заміни. Імовірність безвідмовної роботи системи залежить від кількості основних та резервних елементів, а також від імовірності безвідмовної роботи кожного окремого елемента.

Припущення: ймовірності безвідмовної роботи основних і резервних елементів однакові, а їх відмови є незалежними подіями; резервні БПЛА постійно перебувають у повітрі; відмова виявляється миттєво; заміна БПЛА, що відмовив, виконується миттєво.

Імовірність безвідмовної роботи системи P_s можна розрахувати за формулою

$$P_s = \sum_{k=0}^m C(n+m, k) * P^{n+m-k} * (1-P)^k, \quad (3)$$

де $C(n+m, k)$ – кількість комбінацій вибору k відмов серед n основних і m резервних БПЛА;

P – імовірність безвідмовної роботи одного БПЛА за заданий час;

n – кількість БПЛА, що безпосередньо виконують завдання, у мережі;

m – кількість резервних БПЛА, що можуть замінити основні літальні апарати в разі їх відмови;

k – кількість відмов.

Обчислимо (табл. 3) для варіантів 1 і 2 реалізації стратегії ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ. Знайдемо m , за умови якої ймовірність безвідмовної роботи всієї системи задовольнятиме умову $P_s \geq P_{req}$.

Таблиця 3. Розрахунки ймовірності безвідмовної роботи системи

Варіант	λ	P (20)	n	m	P_s	Умова ($P_s \geq P_{req}$)	Ціна всіх БПЛА ($price * (m + n)$)
Варіант 1	0,0010	0,980	5	0	0,904	$0,904 \geq 0,9$	10000
Варіант 2	0,0013	0,974		0	0,878	$0,878 < 0,9$	7500
				1	0,990	$0,990 \geq 0,9$	9000

Для варіанта 1 за відсутності резерву маємо ймовірність безвідмовної роботи (протягом 20 год) системи $P_s = 0,904$, що задовольняє задане обмеження ($P_s \geq P_{req}$). У цьому разі ціна флоту БпЛА становить 10 000 USD.

Для варіанта 2 за наявності одного резервного БпЛА маємо ймовірність безвідмовної роботи (протягом 20 год) системи $P_s = 0,990$, що задовольняє задане обмеження ($P_s \geq P_{req}$). У цьому разі ціна флоту БпЛА становить 9000 USD.

Зважаючи на вищу ймовірність безвідмовної роботи та нижчу вартість флоту БпЛА, варіант 2 є економічно більш вигідним. Його вибір дає змогу максимізувати показник економічної ефективності, зменшити сумарні витрати та забезпечити вищу надійність системи.

Розглянуті приклади мають суто ілюстративний характер, загалом пошук найкращої за визначеним критерієм стратегії має ґрунтуватися на класичних методах оптимального резервування, адаптованих для БпЛА й пошуку маршрутів [20], а також на застосуванні стохастичних мереж Петрі або марковських випадкових процесів для відновлюваних ЛМ [21].

5 Висновки

5.1 Основні результати

Ключовим результатом цього дослідження є алгоритм вибору стратегій підтримки надійного функціонування літальної мережі, розгорнутої для забезпечення оптико-бездротових комунікацій між джерелами й отримувачами інформації.

У роботі узагальнено класифікатор стратегій за додатковими ознаками, що дало змогу розширити множину стратегій, якщо порівнювати зі статтею [18]. Запропоновані варіанти критеріїв допомагають варіювати постановки задачі вибору стратегій. Приклад надано для одного з простих критеріїв, який ілюструє покрокову процедуру вибору стратегії, що доповнюється розрахунками показників надійності.

Наукова новизна результатів, на думку авторів, полягає в такому:

- додано класифікаційну ознаку "наявність ремонту та обслуговування", що дало змогу розширити

множину стратегій розгортання ЛМ БпЛА. Важливість уваги до цієї доволі відомої ознаки зумовлена тим, що вона передбачає створення повністю автоматично працюючих депо БпЛА;

- визначено різноманітні критерії для вибору оптимальних стратегій розгортання комунікаційних мереж БпЛА, що дає змогу системно обґрунтовувати варіанти вибору;

- запропоновано алгоритм для вибору стратегій розгортання мережі БпЛА на основі запропонованих критеріїв, який визначає основні етапи пошуку залежно від вимог.

Отже, дослідження розширює базис стратегій розгортання літальних мереж і надає інструменти для їх ефективного вибору та адаптації до змінних умов експлуатації. Це сприяє підвищенню надійності та ефективності ЛМ у кризових ситуаціях, забезпечує безперервність передачі даних між джерелами та отримувачами інформації.

5.2 Перспективи роботи

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- розроблення алгоритмів для автоматизованої заміни БпЛА, що беруть до уваги різні сценарії розгортання залежно від класифікаційних ознак;

- створення та дослідження математичних моделей надійності, що описують поведінку систем за умови використання різних стратегій розгортання ЛМ. Це передбачає аналіз впливу різних факторів на безперебійність (безвідмовність) роботи системи, надійність загалом;

- розроблення програмного забезпечення для розв'язання задач і створення системи підтримки прийняття рішень, що дасть змогу автоматизувати процеси планування та розгортання літальної мережі БпЛА;

- дослідження впливу кіберзагроз на гарантоздатність (безпеку та надійність) ЛМ, а також розроблення методів захисту від кібератак;

- аналіз економічної ефективності різних стратегій розгортання та обслуговування ЛМ з огляду на витрати на обладнання, експлуатацію та обслуговування;

- розроблення IT-архітектури ЛМ і комплексу обслуговування.

Список літератури

1. A review of flying ad hoc networks: key characteristics, applications, and wireless technologies / F. Pasandideh et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 18. 4459 p. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Non-terrestrial networks with UAVs: A projection on flying ad-hoc networks / M. Nemati et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 11. 334 p. DOI: 10.3390/drones6110334
3. Petritoli E., Leccese F., Ciani L. Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 9. 3171 p. DOI: 10.3390/s18093171
4. Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment / D. Horvath et al. *Entropy*. 2019. Vol. 21, No. 11. 1077 p. DOI: 10.3390/e21111077
5. Tian Z., Haas Z. J., Shinde S. Routing in Solar-Powered UAV Delivery System. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 10. 282 p. DOI: 10.3390/drones6100282
6. Lee G., Saad W., Bennis M. Online Optimization for UAV-Assisted Distributed Fog Computing in Smart Factories of Industry 4.0. *GLOBECOM 2018 - 2018 IEEE global communications conference*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441
7. Ruban I., Lebediev V. Method for determining the rational number of uav flotilla taking into account the reliability of the aircraft. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023. No. 1 (23). P. 108–114. DOI: 10.30837/itssi.2023.23.108
8. Deep Neural Network for Autonomous UAV Navigation in Indoor Corridor Environments / R. P. Padhy et al. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 643–650. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.099
9. Bachrach A., He R., Roy N. Autonomous Flight in Unknown Indoor Environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2009. Vol. 1, No. 4. P. 217–228. DOI: 10.1260/175682909790291492
10. Bills C., Chen J., Saxena A. Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 9–13 May 2011. DOI: 10.1109/icra.2011.5980136
11. Duong T. Q., Nguyen L. D., Nguyen L. K. Practical optimisation of path planning and completion time of data collection for uav-enabled disaster communications. *2019 15th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*, Tangier, Morocco, 24–28 June. 2019. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511.
12. Robust UAV mission planning / L. Evers et al. *Annals of Operations Research*. 2012. Vol. 222, No. 1. P. 293–315. DOI: 10.1007/s10479-012-1261-8
13. Alwateer M., Loke S. W., Rahayu W. Drone services: An investigation via prototyping and simulation. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Singapore, 5–8 February 2018. DOI: 10.1109/wf-iot.2018.8355153
14. Autonomous Decision-Making Method for Combat Mission of UAV based on Deep Reinforcement Learning / J. Xu et al. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chengdu, China, 20–22 December 2019. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066
15. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement / K. Leichenko et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. Vol. 2024, No. 1. P. 176–195. DOI: 10.32620/reks.2024.1.14
16. Лейченко К. М., Фесенко Г. В. Програмний засіб підтримки планування розгортання LiFi мережі на основі БПЛА для забезпечення передачі даних в умовах руйнувань. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2024. Т. 1, № 75. С. 193–200. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.193
17. Лейченко К. М., Фесенко Г. В., Харченко В. С. Стратегії розгортання та методи забезпечення надійності рою БПЛА для утворення LiFi мережі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 1. С. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3
18. Тереник Д., Харченко В. С. Класифікація стратегій забезпечення надійності літаючої мережі для забезпечення комунікацій в умовах руйнувань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 2. С. 357–370. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-78-41
19. Тереник Д., Кучук Г. А. Порівняння SQL та NoSQL баз даних на прикладі проектування аффілейт репорт систем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 1. С. 83–89. DOI: 10.32620/reks.2020.1.08
20. Gal Y., Zarrouk D. Task-Based Motion Planning Using Optimal Redundancy for a Minimally Actuated Robotic Arm. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 19. P. 9526. DOI: 10.3390/app12199526
21. Stochastic Modeling for Assessing the Reliability and Availability of Drone-Based Surveillance Systems / L. Lins et al. *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada, 15–18 April 2024. DOI: 10.1109/syscon61195.2024.10553470

References

1. Pasandideh, F., da Costa, J. P. J., Kunst, R., Islam, N., Hardjawana, W., Pignaton de Freitas, E. (2022), "A review of flying ad hoc networks: key characteristics, applications, and wireless technologies". *Remote sensing*. No. 14(18), 4459 p. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Nemati, M., Al Homssi, B., Krishnan, S., Park, J., Loke, S. W., Choi, J. (2022), "Non-terrestrial networks with uavs: a projection on flying ad-hoc networks". *Drones*. 6(11), 334 p. DOI: 10.3390/drones6110334
3. Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L. (2018), "Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles". *Sensors*. 18(9), 3171 p. DOI: 10.3390/s18093171
4. Horvath, D., Gazda, J., Slapak, E., Maksymyuk, T. (2019), "Modeling and analysis of self-organizing uav-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment". *Entropy*. 21(11), 1077 p. DOI: 10.3390/e21111077
5. Tian, Z., Haas, Z. J., Shinde, S. (2022), "Routing in solar-powered UAV delivery system". *Drones*. 6(10), 282 p. DOI: 10.3390/drones6100282
6. Lee, G., Saad, W., Bennis, M. (2018), "Online optimization for uav-assisted distributed fog computing in smart factories of industry 4.0". *GLOBECOM 2018 - 2018 IEEE global communications conference, 9–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates*. IEEE. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441
7. Ruban, I., Lebediev, V. (2023), "Method for determining the rational number of uav flotilla taking into account the reliability of the aircraft". *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 1 (23), P. 108–114. DOI: 10.30837/itssi.2023.23.108
8. Padhy, R. P., Verma, S., Ahmad, S., Choudhury, S. K., Sa, P. K. (2018), "Deep neural network for autonomous UAV navigation in indoor corridor environments". *Procedia computer science*. 133, P. 643–650. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.099
9. Bachrach, A., He, R., Roy, N. (2009), "Autonomous flight in unknown indoor environments". *International journal of micro air vehicles*. 1(4), P. 217–228. DOI: 10.1260/175682909790291492
10. Bills, C., Chen, J., Saxena, A. (2011), "Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues". *2011 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), 9–13 May 2011, Shanghai, China*. IEEE. DOI: 10.1109/icra.2011.5980136
11. Duong, T. Q., Nguyen, L. D., Nguyen, L. K. (2019), "Practical optimisation of path planning and completion time of data collection for uav-enabled disaster communications. *2019 15th international wireless communications and mobile computing conference (IWCMC)*, 24–28 June 2019, Tangier, Morocco. IEEE. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511
12. Evers, L., Dollevoet, T., Barros, A. I., Monsuur, H. (2012), "Robust UAV mission planning". *Annals of operations research*. 222(1), P. 293–315. DOI: 10.1007/s10479-012-1261-8
13. Alwateer, M., Loke, S. W., Rahayu, W. (2018), "Drone services: an investigation via prototyping and simulation". *2018 IEEE 4th world forum on internet of things (wf-iot)*, 5–8 February 2018, Singapore. IEEE. DOI: 10.1109/wf-iot.2018.8355153
14. Xu, J., Guo, Q., Xiao, L., Li, Z., Zhang, G. (2019), "Autonomous decision-making method for combat mission of UAV based on deep reinforcement learning". *2019 IEEE 4th advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*, 20–22 December 2019, Chengdu, China. IEEE. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066
15. Leichenko, K., Fesenko, H., Kharchenko, V., Illiashenko, O. (2024), "Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement". *Radioelectronic and computer systems*. 2024(1), P. 176–195. DOI: 10.32620/reks.2024.1.14
16. Leichenko, K., Fesenko, H. (2024), "A software tool to support the planning of the deployment of a lifi network based on BPL to ensure data transmission in conditions of destruction". [Prohramnyi zasib pidtrymky planuvannia rozghortannia lifi merezhi na osnovi bpla dlia zabezpechennia peredachi danykh v umovakh ruinuvan]. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*. 1(75), P. 193–200. DOI: 10.26906/sunz.2024.1.193
17. Leichenko, K., Fesenko, H., Kharchenko, V. (2024), "Deployment strategies and methods for ensuring the reliability of a swarm of UAVs for the formation of a lifi network". [Stratehiji rozhortannja ta metody zabezpechennja nadijnosti roju bpla dlja utvorennja lifi merezhi]. *Measuring and computing devices in technological processes*. (1), P. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3
18. Terenik, D., Kharchenko, V. (2024), "Classification of strategies for ensuring the reliability of the flying network for ensuring communications in conditions of destruction". [Klasyfikacija stratehij zabezpechennja nadijnosti litajuchoji merezhi dlja zabezpechennja komunikacij v umovax rujnuvan]. *Measuring and computing devices in technological processes*. No. 2, P. 357–370. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-78-35
19. Terenik, D., Kuchuk, H. (2020), "Comparison of sql and nosql databases on the example of designing affiliate report systems". [Porivnjannja sql i nosql baz danyx na prykladi proektuvannja affilejt report system]. *Radioelectronic and computer systems*. (1), P. 83–89. DOI: 10.32620/reks.2020.1.08

20. Gal, Y. and Zarrouk, D., (2022), "Task-Based motion planning using optimal redundancy for a minimally actuated robotic arm". *Applied Sciences*. 12(19), 9526 p. DOI: 10.3390/app12199526
21. Lins, L., Nascimento, E., Dantas, J., Araujo, J. and Maciel, P. (2024), "Stochastic modeling for assessing the reliability and availability of drone-based surveillance systems". *IEEE international systems conference (syscon)*, 5–18 April, Montreal, QC, Canada. *IEEE*, P. 1–8. DOI: 10.1109/syscon61195.2024.10553470

Надійшла (Received) 15.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тереник Дмитро – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", магістр зі спеціальності "Комп'ютерна інженерія", аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: d.terenik@student.csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4173-8757>

Харченко Вячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

Terenyk Dmytro – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Master of Science in Computer Engineering, PhD 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.

CHOOSING STRATEGIES FOR DEPLOYMENT AND ENSURING THE RELIABILITY OF A UAV SWARM TO SUPPORT COMMUNICATIONS IN DESTRUCTION CONDITIONS

The **subject matter** of the article is the system of communication networks of UAVs (flying networks, FNs), which use LiFi technology for data transmission from the source to the receiver in conditions of physical obstacles and cyber threats, as well as deployment and reliability assurance strategies (DRAS) of FNs. The **goal** of the work is to develop criteria and algorithms for choosing DRAS of FNs that provide the necessary level of reliability and efficiency under given constraints. The following **tasks** were solved in the article: systematization of deployment strategies and ensuring the reliability of the flying network; formulation of principles and development of an algorithm for choosing the optimal deployment strategy and ensuring the reliability of FNs; providing recommendations on choosing the optimal deployment strategies and ensuring the reliability of the flying network. The following **methods** are used: system analysis for choosing the optimal DRAS; theory of reliability and system efficiency. The following **results** were obtained: the classifier of FNs deployment strategies was expanded due to additional features of repair and maintenance, as well as the presence of cyber attacks; the criteria for choosing deployment strategies and ensuring the reliability of FNs are formulated; an algorithm for choosing the optimal deployment strategy and ensuring the reliability of FNs was developed; the analysis is carried out and an example of the application of the developed algorithms is given to illustrate the step-by-step procedure for choosing a strategy, which is accompanied by calculations of reliability indicators. **Conclusions:** the proposed sets, criteria, and algorithm for choosing deployment and reliability assurance strategies of FNs enable the substantiation of a set of parameters and planning of the implementation of the optimal (according to the defined criterion) policy for the introduction of an automatic communication support system at critical infrastructure objects under conditions of destruction and cyber influence, as well as increase efficiency (minimize cost) of the use of flying networks.

Keywords: UAV; LiFi; flying networks; choice algorithms; reliability; strategy efficiency.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Тереник Д., Харченко В. С. Вибір стратегій розгортання і забезпечення надійності рою БПЛА для підтримки комунікацій в умовах руйнувань. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091>

Terenyk, D., Kharchenko, V. (2024), "Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091>

O. IASTREMSKA, L. MALYARETS, V. SAMOILENKO, O. BUDARIN

MANAGEMENT OF INNOVATIVE PROJECTS TO ENSURE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF ENTERPRISES

The **subject** of the study is theoretical provisions, methodology of adaptive management of innovation projects and innovative development of enterprises, methodological basis, practical proposals for its research in modern conditions. The **purpose** of the article is to summarize generalization of the theoretical basis of the features of innovative projects, the expediency of using organizational structures for managing the processes of their formation and implementation, analysis of adaptive methodologies for managing innovative projects to ensure the employment of workers, their innovative development, and development of practical recommendations on these issues for a working enterprise. The purpose is revealed by solving the following **tasks**: generalize the features of innovative projects that determine the success of their implementation; determine the feasibility of using organizational structures of enterprise management for the formation and implementation of innovative projects to ensure innovative development; identify and propose the use of adaptive management methodologies for innovative projects to achieve successful innovative development of enterprises; develop a hybrid organizational structure for innovation management; the main directions of innovative personnel management of enterprises to promote their employment and management of innovative development are proposed. To solve the tasks, the following **methods** were used: theoretical generalization, analysis, synthesis, induction and deduction, structural and logical analysis, systemic and situational approaches, the method of working day photography, Agile adaptive management methodology, graphic method, and the authors' own practical experience. The **conclusions and results** of the article are as follows: it is proved that the management of innovation projects should take into account their features, be based on the use of project, matrix and hybrid organizational management structures and the application of adaptive methodologies for managing innovation development and the formation and implementation of innovation projects, such as Agile, Scrum, Kanban, Lean. For the operating enterprise Nebozvid LLC, using adaptive management methodologies, a hybrid organizational structure of the project department has been developed to ensure the innovative development of the enterprise through the implementation of innovative projects with the organization of small project teams. The main trends in innovative personnel management of enterprises are proposed, the use of which contributes to the success of innovative project management to ensure the innovative development of enterprises.

Keywords: innovative project; innovative development; organizational management structures; adaptive management methodologies; trends; innovative personnel management; employment of workers.

Introduction

In the complex world of business and technological progress, the role of innovation projects is becoming increasingly important. These projects, which differ significantly from traditional ones, such as investment projects, focus on creating new products, services, or processes with the potential to have a significant impact on markets and societies. The essence of these projects lies not only in their novelty, but also in their ability to expand the boundaries of socioeconomic realities and stimulate qualitative changes in business processes. This is a particularly important feature of innovative projects in the current military environment and the future post-war period, as the implementation of innovative projects will enable enterprises to increase profits and focus their activities on creating unique products or introducing advanced technological processes that are difficult to copy, which will be a certain protection for the competitiveness of business entities.

The management of innovation projects is characterized by dynamism, focusing on the complexity of the modern business environment. These projects often involve exploring uncharted territories, which requires a unique combination of creativity, strategic thinking, and adaptability. Unlike conventional projects, which can focus on achieving clearly defined outcomes within specified parameters, innovation projects, being predominantly exploratory, deal with a higher degree of uncertainty and risk. This makes the role of project management crucial, as it involves not only guiding these projects to implementation, but also managing the inherent unpredictability that characterizes them.

The impact of innovation projects on business operations and markets is profound. In an era when technology is evolving rapidly and consumer demands are constantly changing, innovation is becoming a cornerstone for businesses to stay relevant and competitive. Businesses that succeed in managing innovation projects are leaders in their industries, setting

trends and defining future standards. Thus, these projects are not only about creating new products or services, they can ensure the success of future businesses and markets.

One of the key aspects of managing innovation projects is understanding the balance between creativity and feasibility. While innovation requires out-of-the-box thinking, it also requires a pragmatic approach to ensure that ideas are not just imaginative, but are also realizable and aligned with business goals. This balance is critical to turning creative ideas into successful projects that deliver real value. In addition, managing innovative projects requires staff to have specific professional competencies and continuous learning. Project managers in this field must be able to handle ambiguity, make decisions with incomplete information, and be able to lead and motivate diverse teams. They also need to be proficient in a variety of project management methodologies, from Agile to Lean, each of which offers different benefits and is suitable for different types of innovation projects. In the field of innovation project management, the importance of different methodologies and the role of technology and leadership are becoming increasingly evident. Agile and Lean methodologies, which focus on adaptability and efficiency, play a crucial role in managing the unique requirements of innovation projects. The challenges of aligning these innovative approaches with organizational culture, securing resources, and managing diverse teams are central to the discourse on innovative project management. The integration of management technologies for innovative projects is gradually becoming transformative. Tools such as artificial intelligence, big data analytics, and the Internet of Things are not only facilitators but also enablers that increase the scale and efficiency of innovation projects. Balancing the technical aspects with the indispensable human element of creativity and intuition is a critical challenge facing businesses in managing innovation projects. Business internationalization is the main driving factor that contributes to the intensification of the development and implementation of innovative projects that become the basis for innovative development [1]. Based on the National Economic Strategy 2030, the national state agency for the development of Industry 4.0, the Digital Innovation Hub network, and a network of innovation clusters, especially in the IT industry, are being developed, but the issue of determining the feasibility of using adaptive methods of managing innovative projects, taking into account their modern features, to ensure the innovative development of

enterprises that can ensure the success of their activities through the latest management methodologies is not yet resolved. Therefore, it is advisable to analyze current proposals related to these issues to take them into account in the process of managing innovation projects to ensure the innovative development of business entities.

Analysis of recent research and publications

The dissemination of modern methods of managing innovation projects for the innovative development of enterprises is a topical issue that is being studied by the global scientific community. Based on the latest publications for the period from 2022 to 2024 in the most professionally developed and well-known scientometric database Scopus, the following generalizations can be made about the state of the research problem and the achievements of scientists in this area.

An important area of publications and proposals is the management of innovative projects through organizational structures and the introduction of modern digitalization achievements that affect the acquisition of certain new features by innovative projects.

Feng and Yiming (2024) explore the landscape of digital transformation, characterized by profound changes in organizational structures and operating models [11]. Central to this transformation is the role of artificial intelligence (AI), which creates many challenges and opportunities. This study examines the use of AI technologies to promote organizational innovation, with a focus on their impact on structural change. The author emphasized that in modern conditions, there is a lack of comprehensive analysis and assessment of the organizational aspect to quickly identify and integrate knowledge into project management. This conclusion confirms the relevance and necessity of analyzing the organizational component of managing innovation projects and innovative development of enterprises.

This topic will be continued by Zhang, Juliana J. Y. et al (2023), who reasonably consider the process of managing innovative projects for innovative development in terms of digitalization as a modern trend in the global economic space [41]. The authors analyze the organizational aspects of implementing and managing chatbots to manage the development of enterprises, organizational factors of influence. We can agree with the article's conclusions about using the benefits of digitalization to transform the management of innovative

development and applying the advantages of the IT industry to this process and management methodology.

Since qualified specialists are involved in the functioning of project teams, scientists are exploring the peculiarities of innovative management of personnel and other economic resources of enterprises in the process of innovative development. The resource component of innovative projects is highlighted in the article by Alhaqbani, Sultana Fayez et al (2024), which examines the factors that contribute to the successful implementation of technological innovations in Saudi Arabia in the context of factors influencing the implementation of innovative projects, the results of the study revealed the negative impact of project leadership on the effectiveness of technological innovation and the positive significant impact of financial resources and senior management style [8]. That is, considering innovative projects as a set of economic resources, the authors' research shows their inequality and the need to prioritize the management of those types of resources that have the largest share in terms of volume, which relates to the organization of project management of resource intensity as their important modern feature.

Haim, Kurt & Aschauer, Wolfgang (2024) investigated the issues of human resource management in the context of human project management and concluded that it is necessary to train employees in advance to promote the development of creative problem-solving skills in the context of sustainable development [13]. They suggest using the Innovation Focus program, which uses a two-stage approach that combines flexibility, originality, creative personality development, and strategic planning. Such an organization of innovation project management to ensure the innovative development of enterprises indicates the need to apply strategic adaptive management in organizing the formation and implementation of innovative projects.

Nowak, Radoslaw M. (2023) devoted an article to the study of the resistance of employees of an innovation project to the changes that will accompany it, which can affect different stages of the innovation process [23]. To identify methods of reducing resistance, the paper presents a new model that theoretically substantiates three mitigating effects of resistance to change on different elements of absorptive capacity: design/methodology/approach. The article presents specific practical implications for managers and the social consequences of working in a project team that show a decrease in resistance, namely, originality and value of work. These findings are useful for managing

innovative human resources projects and identifying the main trends in innovative methods of managing them.

Schneider, Malte Hans Georg et.al (2022) emphasize that achieving high and consistent use of innovation requires enterprises to focus on project team members and their individual characteristics rather than on organizational design [31]. In addition, a middle management-centered approach that combines implementation leadership and dialog facilitates effective innovation adoption. In summary, the study contributes to innovation adoption by providing a framework to guide future research while helping practitioners to implement innovations more effectively.

A number of publications on project management pay attention to the interaction of performers, organizational structures, and adaptive management methodologies, which is important for innovative development.

A separate issue is the study of the methodology for managing innovative projects and innovative development, which proves the importance of this aspect. Thus, Myronenko and Oleksii (2024) addressed the very important issue of choosing a project management methodology and determined the impact of research and development costs on the income of enterprises in the field of innovation engineering in the context of changing project management methodology [22]. The paper proves that a change in project management methodology significantly affects the costs, timing, and end result associated with research and development, as well as the use of resources, which ultimately affects the company's performance. The results of the study show that the use of project management methodologies such as Waterfall and Agile has a positive impact on the quality of project management and financial performance. Projects implemented according to the Agile methodology are more efficient, reducing the number of canceled and closed projects. Both methodologies lead to the successful completion of most projects, but the percentage of successfully completed projects using the Waterfall methodology is higher than that of Agile. The use of Agile allows to achieve a significant reduction in project implementation time and increase the efficiency of costs and resources. This conclusion is the basis for the use of the Agile adaptive management methodology at domestic enterprises as the preferred one, the implementation of which should be further investigated.

Sitenko, Diana et al (2023) analyzed the effectiveness of the implementation of existing mechanisms for the implementation of innovative projects in the field of renewable energy through auctions [32]. In addition, they identified their shortcomings and provided suggestions for improvement. The analysis uses data from the Kazakhstan Bureau of National Statistics. The analysis of barriers to the implementation of innovative renewable energy projects revealed contradictions in the price regulation of innovative projects, the lack of market-based pricing mechanisms, and the unpreparedness of market infrastructure to integrate with the proposed project sources. The results of the study confirm the need to use adaptive project management methodologies for the success of innovative development and the regulatory role of government institutions in innovation processes.

Stahiv O.V. et al. (2023) have formed scientific and methodological principles and practical recommendations for identifying problem areas and aspects of the implementation of innovation and investment projects [33]. One of the key features of the effectiveness of investment and innovation projects is systematicity, which involves a combination of measures to intensify and develop investment and innovation activities in the organizational, institutional, economic, product and service, social and psychological components. Such proposals can be useful for highlighting the features of innovative projects and basing the process of building organizational structures that can flexibly respond to changes in the environment of innovative projects.

The article by Akhmetzhanova, Aikun Kh. et al (2023) discusses the issues of economics and management of an innovative enterprise through the management of innovative projects [3]. They highlight the main feature of innovation project management as coordination, which is essential for the successful implementation of innovative activities at any level of the enterprise. Such coordinated interaction should facilitate the development and implementation of an effective system for the distribution of productive capital, both tangible and intangible assets. Such an emphasis on the coordination of actions of various organizational systems of the enterprise confirms its importance and the need to take it into account as a feature of innovation projects.

Vysochan, Oleh et al (2022) investigated the use of multicriteria analysis tools to determine the relative

effectiveness of the implementation of a set of projects in the program of innovative development of domestic enterprises [39]. This indicates the expediency of using economic and mathematical methods in the process of managing their formation and implementation and adaptive management methodologies that involve the use of these methods to make management decisions on the implementation of innovative projects.

Zhao, Na et al (2022) found that as the complexity, breadth of experience, and number of agents involved in megaprojects increase, collaborative innovation models become invaluable in helping to achieve sustainable project development and enterprise innovation [42]. The researchers developed a multi-agent simulation model, CIMP, which was developed using the NetLogo tool and covers behavioral factors and interaction rules that affect the process of managing innovation projects. That is, this article combines the human factor and economic and mathematical management tools and takes into account their mutual influence. It is advisable to agree with this proposal and use it, especially when using the Agile methodology when working in small project teams.

The article by Hron, Michal et al (2022) discusses how to develop radical innovations and suggests distributing innovation efforts [15]. The authors conducted a long-term study of a radical innovation project in a digital company that created a separate organization to develop radical innovations, but over time, innovations moved from radical to incremental. It proved difficult to keep the organization separate. In explaining the events in this case study, the authors argue that new theories of digital innovation can be developed with reference to the specific properties of digital artifacts, the diffusion of innovations can contribute to their drift, i.e. the tendency of radical innovation ambitions to drift gradually towards more incremental realizations. Therefore, the authors propose to turn to adaptive methodologies for managing innovation development to support the effective implementation of innovation projects.

Summarizing the areas of research of the international scientific community in recent years on addressing the issues of managing innovation projects for the innovative development of enterprises, we can conclude that they are multidirectional and lack complete agreement in the use of methods to achieve successful management, which will allow us to conclude that it is advisable to continue and develop research on the above mentioned topics.

Unsolved issues.**The purpose and tasks of the work**

The diversity of research on the characteristics of innovative projects, innovative development of enterprises and methodologies for adaptive management of their practical use has confirmed the lack of agreement between scientists and practitioners on the integrated application and development of practical proposals on these issues. That is, the use of Agile methodology for managing innovation projects to ensure the innovative development of enterprises and building organizational structures based on Agile principles remains insufficiently resolved. This confirmed the existence of an objective need to continue further research in a systemic context. Therefore, the purpose of the article is to summarize the theoretical basis for the features of innovative projects, the feasibility of using organizational structures to manage the processes of their formation and implementation, analyze adaptive methodologies for managing innovative projects to ensure the innovative development of enterprises, employment of workers, and develop practical recommendations on these issues for an operating enterprise.

Given this goal, the article solves the following main tasks to achieve it:

- the features of innovative projects that determine the success of their implementation are summarized;
- the expediency of using organizational structures of enterprise management for the formation and implementation of innovative projects to ensure innovative development is determined;
- methodologies for adaptive management of innovation projects to achieve the success of innovative development of enterprises are identified and proposed;
- a hybrid organizational structure for managing innovation projects based on an adaptive project management methodology for a specific operating enterprise has been developed;
- the main trends in personnel management to improve the efficiency of project teams in the process of innovative development of enterprises are identified;
- the main directions of innovative personnel management of enterprises to ensure the employment of workers and management of their innovative development are proposed.

The object of research is the process of managing innovative projects to ensure the innovative development of enterprises.

The subject of the study is the theoretical provisions of adaptive management of innovative projects and innovative development of enterprises and employment of workers, methodological basis, practical proposals for their research in modern conditions.

Materials and methods

The methodological basis of the article is the work of domestic and foreign scientists and practitioners on the problems of innovation, innovation development, and innovation project management, which are the theoretical basis and research materials. The article is based on the results of the authors' independent research on the practice of building and using organizational structures, managing innovative projects and the work of their developers at medical enterprises, in particular, Nebozvid LLC, where they studied photos of the working day of employees who participated in the work of project teams.

In the process of conducting research and writing the article, the following methods of scientific cognition and search were used:

- methods of theoretical generalization, analysis, synthesis, and a systematic approach were used to analyze and summarize the literature, highlight the types of adaptive technologies based on Agile;
- to improve and present the main features of innovative projects, organizational management structures, directions of innovative personnel management to ensure the innovative development of enterprises and the introduction of adaptive management technologies, structural and logical analysis, systemic and situational approaches, and the authors' own practical experience were used;
- to develop proposals for improving the management of innovative projects to ensure the innovative development of a particular enterprise, the methods of working day photography, induction and deduction, and the Agile adaptive management methodology were used;
- a graphical method was used to visualize the proposals and results of the study.

The materials and methods used allowed to expand the directions and offer recommendations for solving the identified unresolved issues identified in the analysis of literature sources in a systemic context.

Results and their discussion

The management of innovative projects should take into account their features that distinguish this type of project from other traditional ones. Based on the authors' own experience and a synthesis of scientific literature [2, 6, 9, 24, 25], the following relevant features of innovation projects are identified.

These projects are characterized by an increased level of novelty, uncertainty, and complexity, which requires a specialized and innovative approach to management [22]. Innovative projects are aimed at implementing a fundamentally new object aimed at meeting the latest or even clearly non-existent consumer needs, using new methods, technologies that have not been used or explored before [33, 40]. That is, novelty and uniqueness, which are unprecedented, are one of the features of innovative projects [2, 4].

The novelty and uniqueness of innovative projects give rise to the second feature – uncertainty and risk [20], i.e. they are unpredictable, and changes in business conditions, such as regulatory, technological, organizational and managerial restrictions, technologies and implementation methods, increase the risk of implementing project ideas. Overcoming these challenges requires a shift from traditional risk management to proactive risk management. This often involves the use of advanced risk management strategies and tools that can anticipate and mitigate potential pitfalls, ensuring that projects remain on track for success [40].

Such uncertainty is associated with complex networked relationships between project implementers, which requires the use of the latest organizational structures and management technologies. Since the combination of different areas of activity is aimed at obtaining and implementing innovations, this adds a synergistic feature to innovation projects that takes into account the complex nature of different areas of activity and a nuanced approach to their management [4–6].

Synergism supports the next feature of innovation projects – interdisciplinarity, which is due to the synergy of different areas of knowledge that ensure the novelty of innovative projects, such as information technology, social sciences, materials science, management technologies, psychological methods of influence and support for developers and implementers to solve complex and diverse problems that accompany the development and implementation of such projects [9, 10].

The fluid and ever-changing nature of innovation projects requires an adaptive and dynamic management approach that ensures the ability to change strategies in response to new ideas, challenges, and opportunities that emerge during the project life cycle. It is the adaptability and dynamism of management that is the next feature of innovative projects.

Innovative projects are usually characterized by intense demand for resources. They require significant investment, time, capital, and specialized competencies, often involving long development cycles and a significant allocation of human and financial resources. This emphasizes the need for strategic planning and resource management to ensure their optimal use and efficiency [21]. That is, an important feature of innovative projects is resource intensity.

A defining feature of innovative projects is their focus on creating a meaningful and significant impact on the objects and subjects of management [16]. This can manifest itself in various forms, from technological breakthroughs and market leadership to significant social contribution and the formation and implementation of innovations that become budgetary for individual territories [3].

A deep understanding of the specifics of innovation projects is not only useful, but necessary for their effective management. These features emphasize the unique challenges and opportunities that such projects present. They serve as important navigational indicators for project managers, directing them to focus primarily on the strategic implications of project formation and the formation of a team of like-minded individuals to foster an innovative environment in enterprises [17]. This helps to align organizational goals with the transformational potential of innovation projects, promoting growth, increasing competitiveness, and ensuring sustainability in an increasingly dynamic and rapidly changing external business environment [2, 19]. That is, a feature of innovative projects is the teamwork of like-minded people. Effective stakeholder engagement is essential in the field of innovation projects. This involves not only the project team and customers, but also a wider range of investors, regulators, and sometimes the wider community [17]. Navigating this complex network of interests and expectations is essential to the success of innovation projects. This requires a deep understanding of stakeholder dynamics and the development of strategies that can harmonize these diverse perspectives and needs [28].

Innovation projects act as harbingers of change and progress, often leading the introduction of innovative technologies or rethinking existing business models, as exemplified by blockchain technologies [10], which have introduced a new technological paradigm and revolutionized certain sectors of the economy, such as finance and supply chains, characterizing the scalability of innovation projects, which spans industries of different focus, transforming them and changing the market landscape [21].

The internal complexity of innovation projects often lies in the complex interaction and integration of various technological, market, and organizational elements. Successfully managing this complexity is not a simple task; it requires a comprehensive and nuanced understanding of these multifaceted components [17]. Project managers need to use sophisticated and holistic project management methodologies that can orchestrate these different elements into a coherent and functional whole. Therefore, the next feature of innovative projects is complexity, which is manifested in ambition [18].

Summarizing the identified relevant features of innovation projects, it is reasonable to conclude that their management should be adaptive, dynamic, proactive, interdisciplinary, synergistic, and strategically oriented. Understanding and effectively navigating the peculiarities and taking them into account is important for project managers and enterprises and not only contributes to the successful implementation of innovative projects, but also develops a culture of continuous improvement and adaptability, which are vital in the modern business landscape, which creates conditions for the innovative development of enterprises, territories, and countries.

In order to take into account the identified features of innovation projects, it is advisable to determine an effective organizational structure for their management, as organizational management structures play a key role in determining how projects are planned, implemented, and monitored. In the context of innovation projects, choosing an appropriate and workable governance structure is crucial to meet the unique challenges and dynamics that innovation projects present to ensure the innovative development of business entities.

Since innovation projects have a specific nature that is reflected in their characteristics, traditional organizational structures that divide the enterprise into separate functional areas, such as marketing, finance, human resources, and that operate independently with their own management and specialized teams, are inappropriate because they do not take into account

such features as synergies, impact, and teamwork. Such structures contribute to the accumulation of deep experience and efficiency in specific functional areas, as employees are organized into teams by function and related competencies. Therefore, when it comes to innovation projects, traditional organizational structures can pose significant challenges, as these projects often require the integration of knowledge and skills across multiple domains. The siloed nature of traditional structures can impede effective cross-functional communication and collaboration. This can be especially detrimental in scenarios where innovative solutions require combining ideas from different functional areas. In addition, the decision-making process becomes slower, as approvals and input from multiple functional departments are often required, which can hinder the flexibility needed for innovative projects to move forward quickly. In turn, the allocation of resources in a traditional structure may not meet the dynamic requirements of innovative projects, leading to situations where critical resources for an innovative project are used to fulfill the normal tasks of the unit, thereby limiting the project's potential [37].

Unlike traditional organizational structures, the project organizational structure has been shown to be inherently designed and used widely enough in Ukraine to serve individual projects as organizational units with teams created specifically for their implementation. This structure provides project managers with significant autonomy and authority, allowing them to make quick decisions and respond quickly to project requirements, which is an important advantage in managing innovative projects and takes into account their management features such as teamwork and impact. The project structure ensures that the innovation goals are achieved, and teams focus on achieving the goals. This focus is especially useful for innovation projects, where clarity of vision and purpose stimulates creativity and problem solving. However, this structure can also lead to problems in resource utilization. Since resources are intended for specific projects, there may be cases of underutilization or overutilization, especially when several projects are running simultaneously or when projects are at different stages of their life cycle [2, 34]. In addition, the project structure often leads to the use of a temporary workforce, where team members can move between projects. While this can provide a variety of experiences for employees, there are increasing problems with this work organization in terms of building a cohesive team culture and retaining knowledge within the team [2].

A more adapted organizational structure for managing the formation and implementation of innovative projects, taking into account their characteristics, is a matrix structure that combines the specialized capabilities of functional departments with the flexibility and focus of project teams. In this hybrid structure, employees have a dual reporting line – they are members of both functional departments and project teams, reporting to both functional managers and project managers. In a matrix structure, the convergence of project and functional relationships requires increased coordination. This complex environment forces project managers to develop a detailed understanding of the organizational workflow, requiring a balance between the requirements of functional managers and the dynamic needs of different projects. The matrix structure also plays a crucial role in developing a strong project culture. Employees participating in various projects gain exposure to different aspects of the business, contributing to a well-rounded perspective and a broad skill set. This diversity is especially beneficial in innovation projects, where different perspectives can lead to more creative and effective solutions [13]. The features of innovative projects supported by matrix structures are teamwork, cross-functionality, efficient use of resources due to their flexibility of application, focus, balance of interests, and goals of decision-making processes.

However, matrix structures do not take into account the vast majority of features of innovative projects, and to this end, proposals have emerged to expand organizational design through the use of flexible project management structures. Such structures support the use of the Agile methodology, which is adaptable and was developed to manage projects, especially innovative ones. Then, according to the Agile methodology [5], a unique organizational structure is formed for each enterprise based on the interaction of small teams of an innovative project that interact on its formation or implementation. Their advantages correspond to matrix structures, and their disadvantages depend on the success of building them at each individual enterprise. In Ukraine, the spread of both the Agile methodology and flexible organizational structures is still not widespread and limited, but promising, so it is advisable to pay attention to their characteristics, which depend on the chosen adaptive methodology based on the Agile idea.

One of the world's most widespread adaptive management methodologies that allows you to successfully use the Agile methodology to build flexible organizational structures for managing innovative

projects is the Scrum Framework, which is designed for dynamic projects whose requirements are constantly changing. In this case, the project is divided into separate phases or sprints, with each sprint leading to a final product segment. This approach is especially useful for complex projects that require frequent adjustments and rapid development. The key emphasis of Scrum is on team collaboration. This requires a high level of discipline and commitment from all team members, supported by effective communication and collaborative problem solving. This focus on teamwork is essential to fostering a productive and cohesive project environment. The Scrum Framework is highly adaptable, allowing teams to respond quickly to changing requirements or market changes. Flexibility makes the organizational structure effective for managing projects with a high level of innovation. The adaptability of the Scrum Framework is one of its most important strengths, allowing teams to change as needed to achieve project goals. Regular retrospectives and reviews are a critical component of the Scrum process, fostering a culture of continuous feedback and process improvement. This focus on continuous improvement is vital to maintaining the quality and effectiveness of innovation project deliverables. Scrum principles have been adopted across industries, moving beyond its origins in software development. Its flexibility and customer-centric approach make the organizational structure appropriate for use in a wide range of sectors. In software development, for example, Scrum facilitates rapid development cycles, allowing teams to quickly adapt to customer feedback and market changes. While Scrum is often considered the most appropriate management methodology for small and medium-sized projects, it can also be effectively applied to larger, more complex projects. An example of this is the Scrum of Scrums platform, where multiple Scrum teams collaborate and combine their efforts to effectively manage large-scale projects. Maintaining a balance between flexibility and discipline is a key aspect of Scrum. Teams need to be adaptable, but they also need to strictly adhere to Scrum principles and practices to ensure the effectiveness of the agile structure. This balance is necessary for the successful implementation of the Scrum methodology. Adoption and use of the adaptive Scrum management methodology resembles mini-startups within an enterprise, which allow the company to constantly innovate and improve, while maintaining its competitive advantage in the market [4, 9].

The Kanban methodology is a key Agile methodology, and is mainly focused on visualizing the

workflow of an innovation project, effectively managing work in progress, and optimizing the overall flow of tasks. This methodology is characterized by the use of Kanban boards, which serve as visual tools for tracking the progress of individual tasks, providing transparency and a comprehensive overview of project progress. This visual tracking is crucial for identifying bottlenecks and optimizing project efficiency, making the workflow smoother and more consistent. One of the significant advantages of Kanban is the flexibility that is achieved in handling tasks. Unlike Scrum, which has more structured sprint cycles, Kanban allows for greater adaptability in task management. This flexibility is especially useful for projects with changing priorities, where tasks may need to be reorganized or reassigned in response to changing project requirements. Kanban design is inherently focused on continuous output, making it ideal for projects that require a steady stream of deliverables. In addition to its traditional applications in the IT and software development industries, Kanban has found utility in a number of other sectors, including marketing, human resources, and manufacturing. For example, in manufacturing, Kanban helps to optimize workflow and inventory management, leading to significant waste reduction and overall productivity. This wider applicability emphasizes the versatility and effectiveness of Kanban in various organizational contexts. A key feature of Kanban is its role in facilitating continuous improvement for teams and projects. By providing a visual representation of work and facilitating easy identification of process bottlenecks, teams using Kanban can iteratively improve their workflows. This continuous improvement process increases both efficiency and productivity, contributing to the overall success and flexibility of the project management process. The adaptability of Kanban boards is another aspect that increases the effectiveness of the methodology. These boards can be widely customized to meet the specific needs of a project or team. Customization can include variations in workflows, types of work items, and the level of detail displayed on the boards. This ability to adapt the Kanban system to the unique requirements of a project makes it an incredibly versatile and valuable tool in the arsenal of project management methodologies. As such, the Kanban methodology stands out as a highly effective project management methodology, especially known for its visual approach to project management, flexibility in task management, and suitability for continuous output. Its widespread use across industries and role in driving

continuous improvement mark Kanban as a critical tool for modern project management that meets a wide range of project types and organizational needs [14].

Based on the principles of lean manufacturing, lean project management, i.e. the Lean project management methodology, aims to maximize value while minimizing waste. That is, optimizing processes, reducing waste, and accelerating delivery times, which makes this methodology particularly suitable for time-sensitive innovation projects. The focus of Lean is on value creation, ensuring that every component of the project positively contributes to the overall goals. Adopting Lean principles often requires a cultural change in enterprises when implementing projects and improving management processes to ensure innovative development. Originally developed for manufacturing, Lean principles have been applied to various other sectors, such as healthcare, construction, and services. For example, in the healthcare sector, Lean innovation project management methodologies have been used to improve patient care processes, leading to increased efficiency and patient satisfaction. The application of Lean extends to services and intelligent work, where its focus on delivering value and eliminating non-essential activities significantly increases efficiency. Lean principles can be effectively integrated with other project management methodologies, such as Agile in its purest form, to create a comprehensive approach that maximizes value and minimizes waste. This integrated approach is particularly effective in managing complex innovation projects where efficiency and adaptability are critical.

Combining different structures and methodologies for managing innovation projects can create a more adaptive and robust organizational management structure. Combining methodologies such as Scrum with Lean principles can combine the adaptability of Scrum with the efficiency of Lean, creating an approach that is well suited for fast-paced innovation projects. The integration of these methodologies should be customized to meet the unique needs and context of each project. This may include a hybrid structure that combines the resource allocation and cross-functional collaboration of a matrix structure with the flexibility of the Agile methodology for project execution [18]. Integrating different project management organizational structures can significantly increase their adaptability and reliability. A synergistic mix of flexible organizational structures and adaptive management methodologies will allow to take into account all the above features of innovative projects. Customizing integrated adaptive methodologies is crucial

and should be aligned with the specific requirements and context of each project. This may involve developing a hybrid structure that combines the strengths of a matrix or hybrid organizational structure in resource allocation in cross-functional collaboration with the flexibility offered by agile adaptive management methodologies.

The integration of hybrid organizational structures and adaptive methodologies for managing innovation projects can ensure the success of the innovative development of enterprises, as enterprises are faced with the task of managing innovative development based on innovative activities, which is ensured through the implementation and development of innovative projects – internal and external, customer-oriented, which help them develop and implement innovations (Fig. 1).

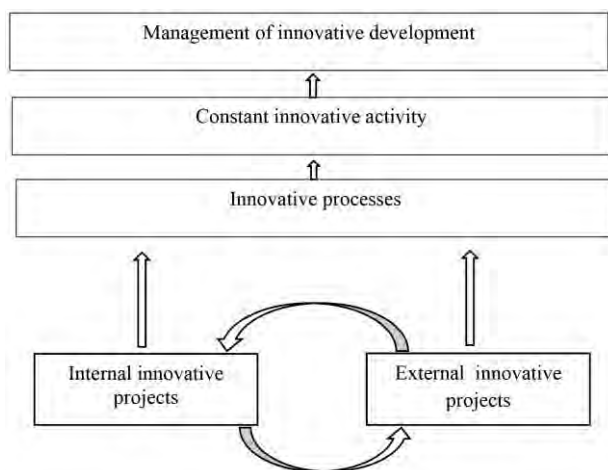


Fig. 1. Interrelation between innovation development management and enterprise project management (generalized by the authors based on practical experience and analysis of enterprise activities)

Projects consist of several stages that are difficult to coordinate (for example, the start date of one stage depends on the timing of the previous stages). Effective project management requires well-established organizational processes based on open communication and workflow control. One of the main advantages of applying agile management methodologies is achieving goals at each stage of the work while remaining flexible and open to change. Thus, agile development answers the question that many large companies face – how to achieve control over project development while introducing innovative ideas and maintaining creativity.

Most projects involve some risk. One way to minimize risk is to be open to change during the project development process. By encouraging individual responsibility and collaboration among team members,

agile development ensures adaptability in project management. In addition, a workflow based on agile development principles encourages creativity, thus ensuring that the project management process evolves. The most effective way to execute successful innovation projects is to form a small project team and manage it using Agile methods. Small project teams are an organized group of people united by common processes and goals. Social ties are formed within the group, meaning that group members are in direct contact with each other, which is the basis for the emergence of emotional connections and relationships, as well as group norms of behavior. A significant advantage of small project teams is the flexible distribution of roles and responsibilities depending on the current tasks. This is an important factor, as many tasks can be loosely regulated, and the speed of finding the right solution and the efficiency of processes depend on how flexible and active employees are. A small group is created for a certain period of time, namely to develop a specific project. Since any project has a clear deadline, organizing a small project team requires more careful planning. The need for careful planning arises when small project teams work on atypical projects. In this case, the group needs to resort to new development methods as well as new tasks. It is necessary to take into account the fact that some employees may be involved in the development of several projects at the same time. Effective planning in this situation will allow you to distribute tasks in such a way as to minimize time overlap.

Small project teams are quite effective in the project, but there are a number of problems that may include:

- communication difficulties;
- planning difficulties;
- negative retrospective experience of executors working on already completed projects.

Communication is an important element in the work of small project teams that is often overlooked. Effective communication should be established between all members of the same project team. This way, less time is spent on solving atypical tasks. Ineffective communication can be encountered at the stage of communicating with the client and collecting initial information. Often, small project teams do not recognize this as a problem, which can cause the project to go beyond the deadline. The specifics of small project teams require careful planning of the work of the performers. A common problem is the project manager's lack of competencies and flexibility. In such a situation, the workload of small project team members may be

distributed inefficiently, which can lead to further exhaustion of employees and failure to meet deadlines.

A project retrospective allows you to evaluate the quality of work of each project team member, the degree of complexity of the tasks implemented and the methodologies used, as well as the effectiveness of planning. This is an important element that allows you to summarize the experience gained, systematize it, and use it in future work. However, this is often overlooked in the work of project teams due to the lack of necessary resources, such as the competence of executors to analyze project retrospectives and understand the need for its implementation [20].

Conducting a retrospective involves collecting and processing a large amount of information. It is necessary to take into account the fact that the collection of information should be carried out as tactfully as possible in relation to the members of the project team, and the effective processing of the information received will allow an accurate assessment of the processes taking place within the formed group. Problems in such groups arise due to a high degree of process orientation. In this case, they can be solved with the help of Agile tools and methodologies. In this article, the authors will consider the Agile manifesto [26] as one of the methodologies. Thus, the focus will be shifted from processes to people and results. To implement this approach, it is necessary to establish interaction between

members of small project teams and the manager (director of innovation development). You can increase the effectiveness of communication between group members by holding daily structured meetings, which will result in information about the current state of project development and problems that have arisen. It is important to build direct communication between the manager and project team members, eliminating unnecessary connections. Planning efficiency can be improved by visualizing processes. Since project activities are often heterogeneous and unpredictable, planning for project implementation and the work of performers must be flexible [12].

Agile tools are associated with the tasks and processes of project activities, as shown in Fig. 2, using Agile; Scrum; Kanban; Lean management methodologies. An analysis of the problems of small project teams helped to identify the tasks that will be solved using the selected Agile tools. Fig. 2 shows the correlation of Agile tools with the tasks set, and also shows how the solved tasks fit into the processes of project activities. The use of agile management, according to which employees are organized into self-organized project teams with no hierarchy and a clear focus on customer needs, helps to accelerate the innovation process, increase its adaptability and profitability. Table 1 shows the comparative characteristics of traditional and agile management by key features.

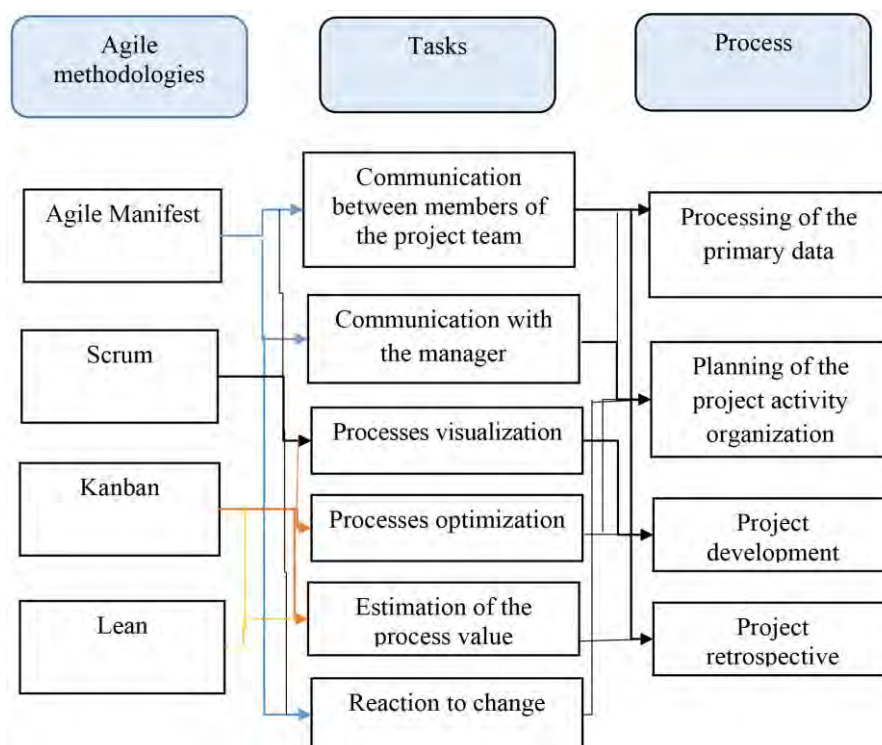


Fig. 2. Selection of Agile methodologies and tools for tasks and processes in a small innovation project team (proposed by the authors)

Table 1. Comparative characteristics of traditional and agile management (summarized by the authors after [4, 5, 19, 24, 25])

Comparative feature	Agile-management	Traditional management
Terms of use	The market situation is constantly changing.	It can be used under any conditions, but in an unstable market situation, its effectiveness is significantly reduced.
Planning of activities	It is complicated by a high degree of uncertainty about the main problems, ways to solve them, and many characteristics of the innovative product.	Each stage of creating an innovative product is carefully planned: key executives are appointed, and the scope of work is distributed in accordance with the tasks set.
Organization of work	The work can be divided into separate parts and performed in quick, repeating cycles. Cross-functional cooperation is effective.	Processes are carried out sequentially at the stages of product creation. Each specialist performs their tasks according to the plan.
Ability to make changes	Changes can be made at any stage of the process, even at the final stage.	Late changes are undesirable because they can lead to undesirable consequences, including loss of resources and time.

Agile projects have proven to be more successful than traditional projects. The results of the 2019 surveys, based on a survey of 1,319 employees of organizations around the world (most respondents are from three industries: IT (25%), banking (19%), and professional services (10%)) showed that agile approaches are rapidly spreading outside the United States – in Europe and Asia; Agile is becoming increasingly popular, particularly in the banking sector and professional services, with the top 5 Agile tools being the most used (daily meetings, sprint/iteration planning, retrospectives, sprint/iteration review, short iterations) [3, 4].

The authors analyze the use of an adaptive methodology for managing innovative projects to ensure innovative development on the example of LLC "Nebozvid". Having studied the main problems in the management of innovation development of LLC "Nebozvid", the ways to overcome them are identified, which are aimed at reorganizing the structure of innovation management, implementing Agile management and creating a project department. Today, in the activities of LLC "Nebozvid", there is a need to organize a set of elements and subsystems that could fully and effectively meet the activities of the enterprise. Thus, it is necessary to consider reorganizing the structure of innovation management at the enterprise using Agile management, which will be realized by ensuring that structural elements and processes meet certain requirements and principles, in particular:

- Implementation of an active innovation strategy of the enterprise aimed at rapid response to changes and market needs during the war in Ukraine and the economic instability caused by it;

- ensuring appropriate conditions for active implementation of innovations in the company's activities;

- determination of motivational levers and employee behavior aimed at meeting the needs of employees;

- creating attractive conditions for strategic decision-making by innovation development managers;

- optimization of enterprise functions.

Formation of a new organizational structure is an effective tool for ensuring efficient innovation activity of an enterprise. The optimal organizational structure of LLC "Nebozvid" will be able to adapt the management and production units of the enterprise in accordance with rapid changes in the market environment and the emergence of new competitors. The next stage in the formation of the management structure of LLC "Nebozvid" for the management of innovative development is the creation and launch of investment and diagnostic units that will analyze and evaluate the innovation climate, set preliminary innovation parameters in accordance with the needs and resources of the consumer, and perform feasibility studies. Thus, the proposed organizational changes at LLC "Nebozvid" will be able to rationalize the process of introducing innovations into the company's activities.

The next problem observed in the activities of LLC "Nebozvid" is the low level of innovation and automation of communication processes. To eliminate this problem and improve the indicators of innovation activity, it is necessary to improve the existing enterprise management complex. In order to improve the company's innovation activities and accelerate the pace of innovation, it is advisable to introduce a new project unit at the company. This department of LLC "Nebozvid" will be responsible for the implementation of certain innovative tasks, which are schematically presented in Fig. 2.

To form an effective project unit, it is necessary to attract highly qualified and responsible specialists with creativity, creative potential, and the ability to develop innovative products. A significant advantage of introducing this unit into the activities of LLC "Nebozvid" is its

ability to ensure the integration of science and enterprise, which will allow us to fully meet the needs of possible consumers. In addition, the design of the department will help simplify the procedure for making innovative decisions at the enterprise and accelerate the introduction of new products.

Fig. 3 lists and schematically shows the innovative tasks of the new project unit. Such tasks include the formation and development of innovative projects, organization and cooperation of innovative programs, implementation and coordination of the innovative development of LLC "Nebozvid".

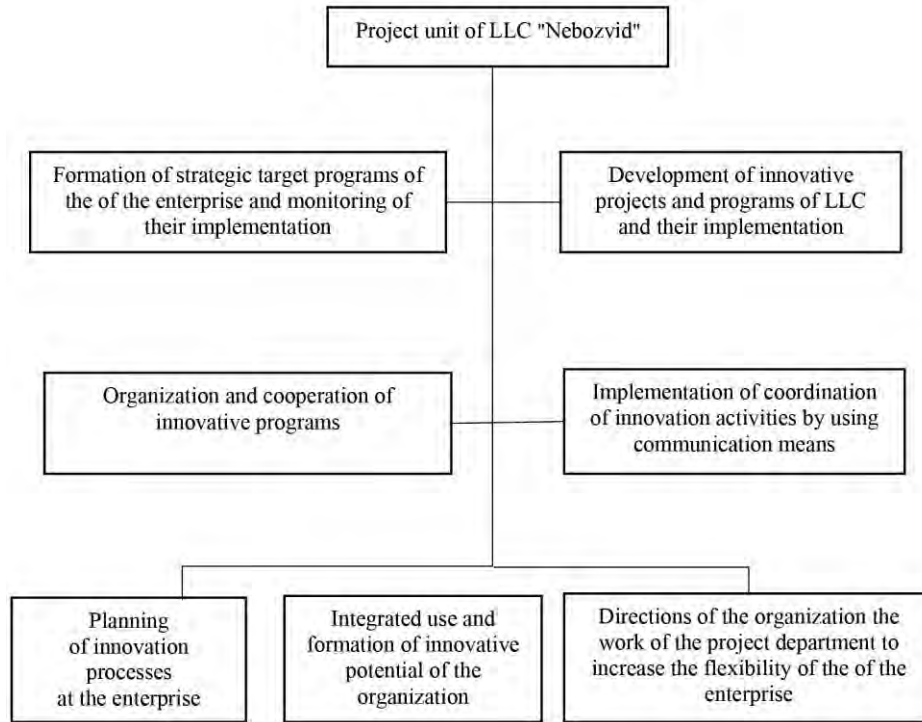


Fig. 3. Innovative tasks of the project unit

The project department of Nebozvid LLC should include personnel focused on the innovative development of the enterprise. From an economic point of view and in order to avoid high costs for the creation and operation of this department, at the first stages it should include a head of the department, a specialist in innovative development

of the enterprise and 4 innovation managers. According to the Agile methodology, these employees will form 2 flexible teams, whose members will move from one team to another depending on the needs of the project.

Fig. 4 shows the structure of the proposed unit based on the Agile methodology.

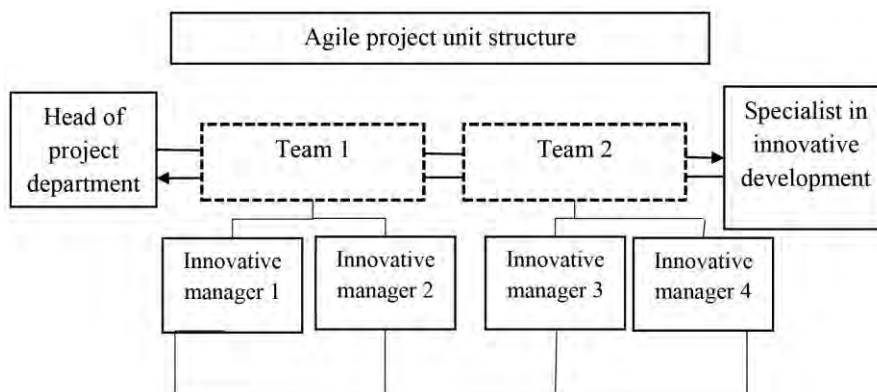


Fig. 4. Structure of the proposed unit based on the Agile methodology

Structures built with the Agile methodology in mind differ significantly from traditional hierarchical structures.

The emphasis is on flexibility, collaboration, and the ability to respond to change, fostering a culture that is

consistent with the iterative and customer-centric principles of the Agile methodology. The transition to an Agile structure also involves a cultural change, emphasizing collaboration, communication and adaptability, which should be done in accordance with innovative HRM methods. To use innovative methods of HR management in accordance with the Agile methodology, the main trends that will determine the HR landscape and affect the cooperation between employees in project teams to ensure the innovative development of enterprises have been identified (Fig. 5).

Innovative development of enterprises based on the implementation of innovative projects managed according to the Agile methodology necessitates the use of the latest methods in human resources management. At the same time, the main focus of HR management should be on the introduction and development of personnel technologies, innovative ideas, and the intensification of the creative activity of employees, and, above all, project teams, which will ensure the success of project activities and create conditions for achieving constructive innovative development.

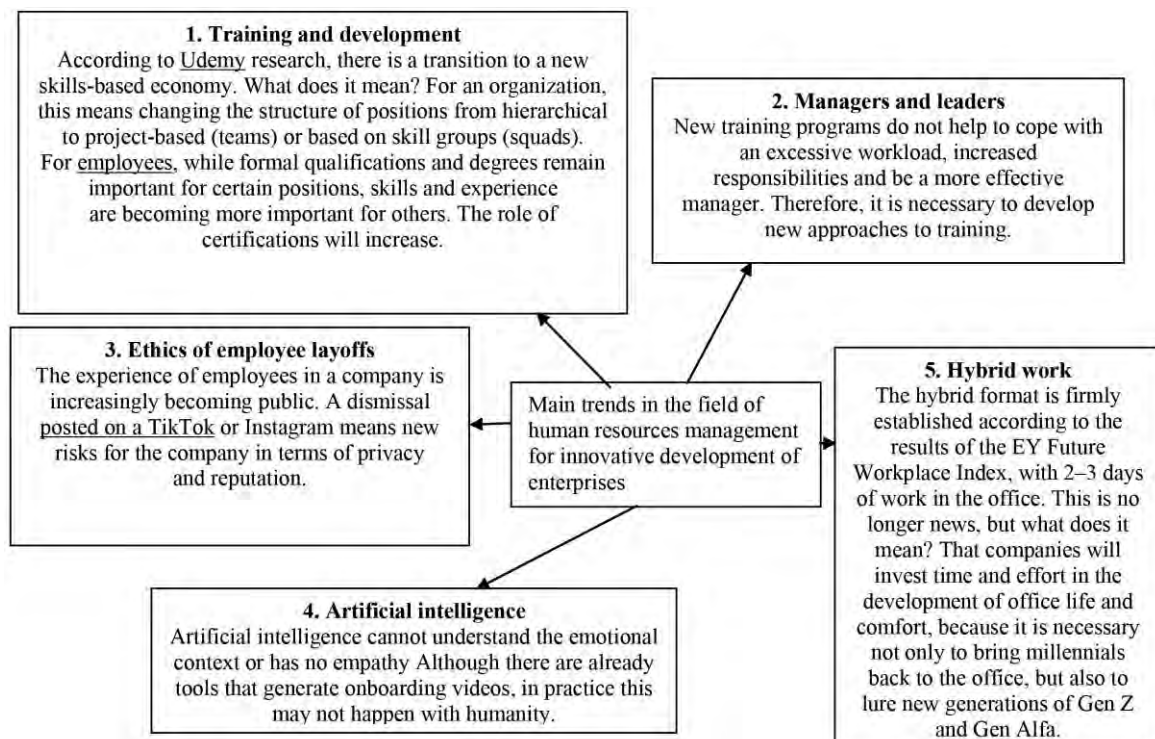


Fig. 5. Analysis of the main trends in the field of human resources management for employment (summarized by the authors)

Conclusions and prospects for further development

The conducted research has confirmed the existence of complexity and multidimensionality of the problem of managing innovation projects to ensure the innovative development of enterprises in modern conditions. The basis of the proposals presented are the generalized features of the formation and implementation of innovative projects, which are analyzed in relation to the existing types of organizational structures of enterprise management; traditional, project, matrix and concluded that hybrid structures are formed using different types of methodologies for adaptive management of innovative projects to ensure the innovative development of enterprises. As varieties of methodologies for adaptive

management of innovative projects for the innovative development of enterprises, the Agile methodology and its most common varieties Scrum, Kanban, Lean were studied directly. Based on their application, proposals have been developed to create a hybrid organizational structure for managing innovation projects, which involves the formation of small project groups using the Agile adaptive management methodology for the enterprise LLC "Nebozvid". In order to achieve successful management of innovative projects for the innovative development of enterprises, the main trends in innovative HR management of enterprises are formed to ensure employment and provide an innovative HR landscape.

Directions for further research on this topic are the development of methodological proposals for the integrated simultaneous use of the analyzed adaptive

management methodologies for large-scale innovation projects implemented by several enterprises on the basis of such organizational forms as an association or consortium.

References

1. Sobolevska Lesia. "Innovations during the war: is it on time?" available at: <https://www.clusters.org.ua/en/blog-about-clusters/innovations-during-the-war-is-it-the-time/>
2. ["Instytut upravlinnia proektamy, upravlinnia proektamy. Praktychnyi posibnyk Agile. SShA, Instytut upravlinnia proektamy"], 2017, S. 7–9.
3. "Adopting Agile: The Latest Reports About The Popular Mindset, 2019", Adeva: available at: <https://adevait.com/blog/remote-work/adopting-agile-the-latest-reports-about-the-popular-mindset>
4. "High Quality Learning - World-class Universities" available at: <http://extension.berkeley.edu/spos/agile.html>
5. ["Serdiuk A. Agile-likbez: shcho take agile ta dlia koho vin pidkhodyt"]. available at: <https://www.management.com.ua/notes/agile.html>
6. ["Khaismit, Dzh. Hnuchke upravlinnia proektamy: stvorennia innovatsiinykh produktiv. Velyka Brytaniia: Pearson Education"], 2009. S. 25–29.
7. Akhmetzhanova, Aikun Kh. Mukhanova, Gaini Kh.; Nazikova, Zhanagul A.; Malaeva, Raushan A.; Beisekova, Zhanna I. (2023), "Economy and Management of an Innovative Enterprise", *International Journal of Interdisciplinary Organizational Studies*, Vol. 18 No. 1, P. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.18848/2324-7649/CGP/v18i01/119-131>
8. Alhaqbani, Sultana Fayez; Abdelwahed, Nadia Abdelhamid Abdelmegeed (2024), "Enablers of the successful implementation of the strategy of technological innovation in higher education", *Corporate and Business Strategy Review*, Vol. 5 No. 2, P. 18 – 28. DOI: <https://doi.org/10.22495/cbsrv5i2art2>
9. Christensen, C. M., & Raynor, M. E. (2003), "The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth." Harvard Business Review Press. available at: <https://www.hbs.edu/faculty/Pages/item.aspx?num=15473>
10. Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., & Kalyanaraman, V. (2016), "Blockchain technology: Beyond bitcoin". *Applied Innovation Review*. available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2525044>
11. Feng, Yiming (2024), "Digital Transformation and Organizational Restructuring: Assessing the Impact of Artificial Intelligence on Organizational Innovation", *Journal of System and Management Sciences*, Vol. 14 No. 2, P. 339–354. DOI: <https://doi.org/10.33168/jsms.2024.0221>
12. Freeman, R. E. (2010), "Strategic Management: A Stakeholder Approach". Cambridge University Press.
13. Haim, Kurt; Aschauer, Wolfgang (2024), "Innovative FOCUS: A Program to Foster Creativity and Innovation in the Context of Education for Sustainability", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 16 No. 6, 2257 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16062257>
14. How Kanban simplifies workflow – 2020. available at: <https://stealthesethoughts.com/2020/02/19/kandan-boards-simplify-work/>
15. Hron, Michal; Obwegeser, Nikolaus; Müller, Sune Dueholm (2022), "Innovation drift: the influence of digital artefacts on organizing for innovation", *Innovation: Organization and Management*, Vol. 24 No. 1, P. 168–200. DOI: <https://doi.org/10.1080/14479338.2021.1937185>
16. Iastremska O. (2019), "Investment and innovative development of industrial enterprises as the basis for technological singularity" / O. Iastremska, H. Strokovich, O. Dzenis, O. Shestakova, T. Umans, *Problems and Perspectives in Management*. Volume 17, Issue 3, P. 477–491. DOI: [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.17\(3\).2019.38](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.17(3).2019.38)
17. Iastremska, O., Strokovych, H., Iastremska, O., Kalantaridis, C., Nagy, S., & Somosi Veresne, M. (2021), "Formation of Mutual Relations Between Enterprises and Business Partners in the Process of Preparation and Production of New Products", *Marketing and Management of Innovations*, 2021, 1, P. 196–211. DOI: <http://doi.org/10.21272/mmi.2021.1-15>
18. Küpper, S. (2016), "The impact of agile methods on the development of an agile culture: research proposal: [the agile evolution]". In *Proceedings of the 20th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 2016, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1145/2915970.2915977>
19. Lester D.L., Parnell J.A., Crandall W., Menefee M. (2008), "Organizational life cycle and performance among SMEs: Generic strategies for high and low performers"/ D.L. Lester, J.A. Parnell, W. Crandall, M. Menefee *International Journal of Commerce and Management*, Vol. 18, No. 4, 2008. P. 313–330. DOI: [10.1108/10569210810921942](https://doi.org/10.1108/10569210810921942)
20. Loch, C. H., DeMeyer, A., & Pich, M. T. (2006), "Managing the Unknown: A New Approach to Managing High Uncertainty and Risk in Projects." *Wiley*. 304 p. DOI: [10.1002/9780470172377](https://doi.org/10.1002/9780470172377)
21. Malyarets L., Iastremska O., Tutova A., Dorohov O. (2023), "Analytical Method of Stimulation for Labour of Top-Managers", *TEM Journal*. Volume 12, Issue 2, P. 1118–1129, DOI: [10.18421/TEM122-58](https://doi.org/10.18421/TEM122-58)
22. Myronenko, Oleksii (2024), "Estimating the influence of research and development expenditures on the income of companies revenue in the field of engineering of innovative developments under the conditions of changing project management methodology", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2 No. 13-128, P 66 – 74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302149>

23. Nowak, Radoslaw M. (2023), "How resistance to change impairs innovation", *Journal of Strategy and Management*, Vol. 16 No. 4, P. 609–629. DOI: <https://doi.org/10.1108/JSMA-08-2022-0144>
24. Pisano, G. P. (2010), "The Development Factory: Unlocking the Potential of Process Innovation." Harvard Business School Press.
25. Prakash, B., & Viswanathan, V. (2017), "A survey on software estimation techniques in traditional and agile development models". *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 7(3), 114 p. DOI: 10.11591/ijeecs.v7.i3.pp867-876
26. "Principles behind the Agile Manifesto". available at: <http://agilemanifesto.org/principles.html>
27. "Professional Sequence in Agile management/UC Berkeley Extension". available at: <http://extension.berkeley.edu/spos/agile.html>
28. Project Management Institute. (2017). "A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) Sixth Edition."
29. Puleo, L., Strategies for Innovative Project Management: Improving Enterprise Performance, *Elektronikk*, 2004, No. 2, 156 c.
30. Schilling, M. A. (2015), "Strategic Management of Technological Innovation". McGraw-Hill Education. available at: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/87807/5/Strategic%20Management%20of%20Technological%20Innovation%20%20Fourth%20Edition%20%28%20PDFDrive.com%20%29.pdf>
31. Schneider, Malte Hans Georg; Hofmeister, Johannes; Kanbach, Dominik K. (2022), "Effective innovation implementation: a mixed method study", *International Journal of Innovation Management*, Vol. 26 No. 6, Art.no. 2250042. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1363919622500426>
32. Sitenko, Diana; Gordeyeva, Yelena; Sabyrzhan, Ali; Syzdykova, Elmira (2023), "Implementation of innovative technologies in Kazakhstan: A case of the energy sector", *Problems and Perspectives in Management*, Vol. 21 No. 4, P. 179–188. DOI: [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21\(4\).2023.14](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21(4).2023.14)
33. Stahiv O.V.; Biletska I.M.; Perepolkina O.O.; Avgustyn R.R.; Mykytyn O.Z. (2023), "Efficiency of the implementation of innovation and investment projects at healthcare institutions: integral analysis and ways of enhancement", *Science and Innovation*, Vol. 19 No. 5, P. 18–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine19.05.018>
34. Takeuchi, H., and Nonaka, I. "The New New Product Development Game". Harvard Business Review. available at: <https://hbr.org/1986/01/the-new-new-product-development-game>
35. "The Kanban Methodology and why you need it for your Software Team! 2020". available at: <https://community.atlassian.com/t5/Jira-Software-articles/The-Kanban-Methodology-and-why-you-need-it-for-your-Software/ba-p/1553608>
36. "The Latest Reports and Stats About Agile 2019", Adeva: available at: <https://adevait.com/blog/remote-work/adopting-agile-the-latest-reports-about-the-popular-mindset>
37. "The State of Agile study 2019". available at: <https://www.pmservices.ru/projectmanagement-news/opublikovano-issledovanie-state-ofagile-2019/>
38. Vance, A. (2015), "Elon Musk: Tesla, SpaceX, and the Quest for a Fantastic Future". Ecco. available at: https://www.academia.edu/41363337/Ashlee_Vance_Elon_Musk_Tesla_SpaceX_and_the_Quest_for_a_Fantastic_Future
39. Vysochan, Oleh; Vysochan, Olha; Hyk, Vasyli; Boychuk, Andriy (2022), "Multi-criteria evaluation of innovative projects by means of electre application", *Business: Theory and Practice*, Vol. 23 No. 2, P. 445–455. DOI: <https://doi.org/10.3846/btp.2022.15001>
40. "Walk-Morris T. Study: Consumers like chatbots but prefer human interaction Importants, T. Walk-Morris . 2019". available at: <https://www.marketingdive.com>
41. Zhang, Juliana J. Y.; Følstad, Asbjørn; Bjørkli, Cato A. (2023), "Organizational Factors Affecting Successful Implementation of Chatbots for Customer Service", *Journal of Internet Commerce*, Vol. 22 No. 1, P. 122–156. DOI: <https://doi.org/10.1080/15332861.2021.1966723>
42. Zhao, Na; Lei, Congcong; Liu, Hui; Wu, Chunlin (2022), "Improving the Effectiveness of Organisational Collaborative Innovation in Megaprojects: An Agent-Based Modelling Approach", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 14 No. 15, Art.no. 9070. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159070>

Надійшла (Received) 05.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Ястремська Олена Миколаївна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, завідувач кафедри менеджменту, логістики та інновацій, Харків, Україна; e-mail: Iastremska_om@hneu.net; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5653-6301>

Малярець Людмила Михайлівна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, завідувач кафедри економіко-математичного моделювання, Харків, Україна; e-mail: malyarets@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1684-9805>

Самойленко Вікторія Вікторівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, доцент кафедри менеджменту, логістики та інновацій, Харків, Україна; e-mail: svita4448@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4702-7193>

Бударін Олексій Сергійович – Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, аспірант кафедри економіко-математичного моделювання, Харків, Україна; e-mail: budarin@ukrenergymachines.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-9914>

Iastremska Olena – Doctor of Sciences (Economics), Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Head at the Department of Management, Logistics and Innovation, Kharkiv, Ukraine.

Malyarets Lyudmyla – Doctor of Sciences (Economics), Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Head at the Department of Economic and Mathematical Modeling, Kharkiv, Ukraine.

Samoilenko Viktoriia – PhD (Economic Sciences), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor at the Department of Management, Logistics and Innovation, Kharkiv, Ukraine.

Budarin Oleksii – Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Postgraduate Student of the Department of Economic and Mathematical Modeling, Kharkiv, Ukraine.

УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЙНИМИ ПРОЄКТАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ

Мета статті – узагальнення теоретичного підґрунтя особливостей інноваційних проєктів, доцільності використання організаційних структур управління процесами їх формування і впровадження, аналіз адаптивних методологій управління інноваційними проєктами для забезпечення зайнятості працівників, їх інноваційного розвитку та розроблення практичних рекомендацій з цих питань для працюючого підприємства. Мета розкрита на основі вирішення таких **завдань**: узагальнено особливості інноваційних проєктів, що зумовлюють успішність їх реалізації; визначено доцільність використання організаційних структур управління підприємствами для формування і впровадження інноваційних проєктів для забезпечення інноваційного розвитку; виявлено і запропоновано впровадити методології адаптивного управління інноваційними проєктами для досягнення успішності інноваційного розвитку підприємств; розроблено гібридну організаційну структуру управління інноваційними проєктами на основі адаптивної методології управління ними для конкретного працюючого підприємства; запропоновано основні напрями інноваційного управління персоналом підприємств для сприяння їх зайнятості та управління інноваційним розвитком. Для вирішення завдань застосовано такі **методи**: теоретичного узагальнення, аналізу, синтезу, індукції та дедукції, структурно-логічний аналіз, системний та ситуаційний підходи, метод фотографії робочого дня, методологію адаптивного управління *Agile*, графічний метод, власний практичний досвід авторів. **Висновки і результати** статті полягають у такому: доведено, що управління інноваційними проєктами повинно враховувати їх особливості, ґрунтуватися на використанні проєктних, матричних та гібридних організаційних структур управління та застосуванні адаптивних методологій управління інноваційним розвитком та формування і реалізації інноваційних проєктів, таких як *Agile*, *Scrum*, *Kanban*, *Lean*. Для працюючого підприємства ТОВ "Небозвід" з використанням адаптивних методологій управління розроблено гібридну організаційну структуру проєктного відділу для забезпечення інноваційного розвитку підприємства на основі впровадження інноваційних проєктів з організацією роботи малих проєктних команд. Запропоновано основні тренди інноваційного управління персоналом підприємств для досягнення успішності управління інноваційними проєктами для забезпечення інноваційного розвитку підприємств.

Ключові слова: інноваційний проєкт; інноваційний розвиток; організаційні структури управління; адаптивні методології управління; тренди; інноваційне управління персоналом; зайнятість працівників.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ястремська О. М., Малярець Л. М., Самойленко В. В., Бударін О. С. Управління інноваційними проєктами для забезпечення інноваційного розвитку підприємств. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 104–120. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.104>

Iastremska, O., Malyarets, L., Samoilenko, V., Budarin, O. (2024), "Management of innovative projects to ensure innovative development of enterprises", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 104–120. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.29.104>

В. ЯРЕЩЕНКО, В. КОСЕНКО

МЕТОД КОДУВАННЯ З НИЗЬКИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ У СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Об'єктом дослідження в статті є технологія *Network-on-Chip (NoC)*, яка стала популярним вибором для внутрішньокристалічної комунікаційної архітектури сучасних пристроїв *System-on-Chip (SoC)*. **Предмет дослідження** – методи зниження розсіюваної потужності в *NoC* і *SoC*. **Мета роботи**: розроблення методу кодування з низьким енергоспоживанням, що дає змогу ефективно передавати або зберігати інформацію. У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз методів класифікації комбінаторних структур, побудова системи типових представників класів еквівалентності та аналіз їх характеристик. **Методи дослідження** ґрунтуються на використанні теорії множин, теорії систем і комбінаторики. **Досягнуті результати**. Проаналізовано фактори, що впливають на розсіювану потужність, і принципи побудови енергоефективних кодів. Показано, що комутаційна активність сприяє значній долі загальної потужності та методи кодування з низьким енергоспоживанням є ефективними для зниження комутаційної активності під час зв'язку між пристроями або зв'язку на кристалі. Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів єдиного розташування та алгоритми розв'язання поетапних задач. В основі методу лежить інваріантний підхід і побудова системи різних представників. Отримано оцінки їх кількості, визначено характеристики, сформовано каталоги типових представників. **Висновки**. У статті проаналізовано фактори, що впливають на розсіювану потужність, розглянуто принципи побудови енергоефективних кодів. Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів єдиного розташування та алгоритми розв'язання поетапних задач, сформовано каталоги типових представників. Застосування розробленого методу дасть змогу розробникам аналізувати й обирати коди з кращими властивостями та, зрештою, отримувати кращі результати щодо мережних затримок, витрат на електроенергію та інших конструктивних обмежень для комп'ютерних систем.

Ключові слова: кодування; коди одиничних відстаней; енергоефективне кодування; комутаційна активність; еквівалентність; класифікація; перерахування.

Вступ (визначення проблеми)

Завдяки масштабованості та високій продуктивності технологія *Network-on-Chip (NoC)* стала популярним вибором для комунікаційної архітектури сучасних пристроїв *System-on-Chip (SoC)*. Через зростання складності *SoC* споживання енергії стало серйозною проблемою в розробленні *NoC* [1].

Комутаційна активність шин є причиною значної частки загальної потужності, що розсіюється у сучасних пристроїв *SoC*. Основним джерелом розсіювання динамічної потужності в цифрових схемах є шини, які звичайно навантажені більшими ємностями вхідного й вихідного вузлів, а також ємності між'єднання. Ці ємності зростають залежно від розвитку технологій. З ускладненням *SoC* кількість шин також збільшується. Для зниження комутаційної активності під час зв'язку між пристроями або зв'язку на кристалі потрібні методи кодування з низьким енергоспоживанням [2, 3].

З огляду на сказане актуальною є проблема пошуку методів кодування з низьким енергоспоживанням, що дають змогу ефективно передавати або зберігати інформацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Чимало проблем теорії кодування можна описати в термінах комбінаторних об'єктів [4]. Ці проблеми потім можуть бути розв'язані з використанням теоретичних і обчислювальних методів. Теорія комбінаторного кодування відповідає зазначеним проблемам, описуючи код як кінцевий набір кодових слів, що містять символи кінцевого алфавіту [5]. Основним є математичний спосіб пошуку кодів, що мають певні комбінаторні властивості.

Математичне моделювання багатьох задач, що мають комбінаторну структуру, вимагає використання нових класів комбінаторних множин. Застосування класичних підходів до опису й генерації елементів комбінаторних множин у реальних завданнях призводить до громіздких результатів і вони не застосовні на практиці. Тому виникає необхідність розроблення конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості [6].

Процес виконання завдання побудови комбінаторних множин, що мають складну комбінаторну структуру, можна поділити на два етапи. Перший етап – опис

і генерація елементів комбінаторної множини із заданими властивостями. Другий етап передбачає підрахунок усіх елементів комбінаторної множини й може бути виконаний методами комбінаторики [7].

Теорія перерахування комбінаторного аналізу здебільшого знаходить і досліджує формули для точного й асимптотичного підрахунку елементів у різних класах комбінаторних об'єктів. Розв'язання конкретної задачі перерахування дає змогу встановити специфічні комбінаторні властивості вихідних об'єктів, що виявляються в самій процедурі перерахування або випливають із досягнутих результатів [8].

Існують такі методи перерахування [8, 9]: безпосередніх підрахувань; рекурентних співвідношень; твірних функцій; асимптотичні методи; теорія перерахування Д. Пойа [10, 11]. Центральне місце серед зазначених методів посідає метод твірних функцій, описаний у роботах М. Клазар [12], Н. Камерон [13], Д. Вест [4]. Зазначений метод має розвинутий математичний апарат, зводить задачу перерахування до визначення кількості послідовностей, що мають або не мають деякі спеціальні властивості. У комбінаторному аналізі застосовуються твірні функції різного виду: твірні функції експонентного типу, ряди П. Діріхле, твірні функції Л. Ейлера тощо.

Теорія перерахування Д. Пойа, основана на роботах В. Бернсайда [14], Ф. Харарі [15], Д. Брейна [16], характеризується введенням відношень еквівалентності на множині об'єктів перерахування щодо заданої групи підстановок.

Розрізняють два основних типи задач перерахування: перерахування позначених об'єктів і об'єктів, нееквівалентних щодо заданої групи підстановок. Для об'єктів першого типу існує чимало різних методів, але вони не повністю уніфіковані. Для задач другого типу схема розв'язання полягає у зведенні задачі другого типу до рішення відповідної або модифікованої задачі першого типу [4, 13].

Застосування теорії Д. Пойа в розв'язанні конкретної задачі вимагає, щоб були виявлені умови її застосовності, задана відповідна група підстановок і явно побудований цикловий індекс [9, 10, 11].

Актуальною проблемою комбінаторики є генерація та підрахунок кількості комбінаторних конфігурацій, що мають задані властивості [17]. У роботах [18, 19] розглянуто побудову формальних описів комбінаторних множин, що мають складну структуру, на основі описів базових комбінаторних множин, до яких належать перестановки, сполучення та розміщення.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Мета роботи, завдання

Специфіка багатьох прикладних комбінаторних задач вимагає відбиття в математичних моделях їх комбінаторної структури, що часто є складною й не може бути адекватно описана відомими комбінаторними множинами. Тому для математичного моделювання й розв'язання зазначених задач вводяться нові комбінаторні множини з необхідними властивостями. Класичні підходи до формалізації визначення комбінаторних множин, будучи універсальними, дають ефективні рішення для простих класів комбінаторних множин. Використання їх для складних комбінаторних конфігурацій призводить до громіздких результатів, не придатних на практиці.

Мета роботи – розроблення методу кодування з низьким енергоспоживанням, що дає змогу ефективно передавати або зберігати інформацію.

У статті розв'язуються такі **завдання**: аналіз методів класифікації комбінаторних структур, побудова системи типових представників класів еквівалентності та аналіз їх характеристик.

Матеріали й методи

У роботах [20, 21] розглянуто метод побудови кодів одиначної відстані та складений каталог для трьох розрядів. Із зростанням кількості розрядів істотно збільшується кількість кодів і розгляд усієї множини кодів стає важким завданням. Тому для його розв'язання був розроблений метод ієрархічної класифікації.

В основі методу лежить розбивка кодів на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень і дослідження властивостей представників класів.

Метою класифікації є побудова деякої повної системи різних представників, що розділяє будь-які два нееквівалентних об'єкти з розглянутої сукупності. У результаті класифікації множина об'єктів розпадається на попарно непересічні класи еквівалентності, у кожному з яких виокремлюється типовий представник.

Оскільки всі об'єкти, що належать одному класу еквівалентності, переходять один до одного внаслідок заданої групи перетворень, то для опису класу еквівалентності досить визначити типового представника, яким може бути обраний будь-який елемент, що належить розглянутому класу еквівалентності. Для однозначного опису типових представників

доцільне визначення об'єкта найпростішого виду, до якого можна привести досліджуваний математичний об'єкт за допомогою розглянутої групи перетворень, тобто побудова канонічних форм.

Канонічна форма математичного об'єкта – це стандартний спосіб подання цього об'єкта у вигляді математичного виразу, що уможливорює його ідентифікацію унікальним способом. Канонічні форми звичайно використовуються для того, щоб зробити роботу з класами еквівалентності більш ефективною [22].

Для класу об'єктів, для яких визначено відношення еквівалентності, канонічна форма полягає у виборі конкретного об'єкта в кожному класі (типового

представника). Представник обирається однозначно серед об'єктів, що належать цьому класу.

Множина типових представників класів еквівалентності утворює систему різних представників. Отже, розглянутий підхід зводиться до рішення комбінаторних завдань, пов'язаних із визначенням існування системи різних представників для сімейства множин, і встановлення кількості систем різних представників, що задовольняють різні критерії.

Ієрархічна класифікація – система, у якій відношення класів утворюють ієрархічну класифікаційну структуру.

На рис. 1 зображена ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані.

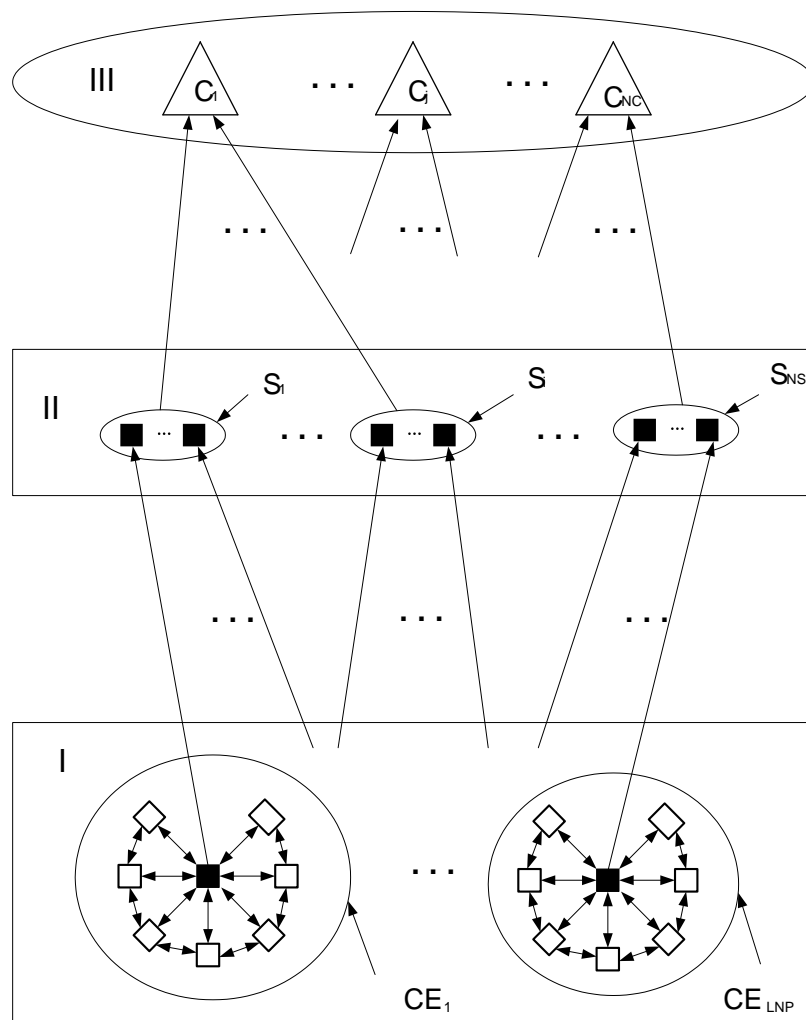


Рис. 1. Ієрархічна класифікаційна структура кодів одиничної відстані

Особливістю ієрархічної класифікації є розгляд на різних рівнях ієрархії різних множин об'єктів, об'єднання їх у класи щодо заданої для розглянутого рівня еквівалентності, визначення типових

представників у кожному класі, побудова множин і типових представників. Тобто на кожному рівні класифікації відбувається перетворення множин і типових представників, що надходять із

попереднього рівня, з огляду на встановлені відношення еквівалентності між класами, у нову множину типових представників, що надходить на наступний рівень класифікації. З переходом на більш високий рівень класифікації кількість типових представників зменшується.

Розглянемо класифікацію кодів одичної відстані за допомогою описаного методу. У поданні матеріалу використовуються позначки і термінологія, прийняті в роботах [20, 21].

Код – бієктивне (взаємно однозначне) відтворення кінцевої впорядкованої множини символів, що належить деякому кінцевому алфавіту Y , на іншу, не обов'язково впорядковану, як правило, більшу множину символів X для кодування, передачі, зберігання або перетворення інформації [5].

Для кодів бієктивна функція має вигляд $f: Y \rightarrow X$, де Y – кінцева впорядкована множина символів, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$; X – множина кодових слів, отримана внаслідок відтворення, $X = \{X^1, X^2, \dots, X^k\}$; k – кількість кодових слів; n – кількість розрядів двійкового коду.

Кодове слово X^i містить n символів (кількість розрядів): $X^i = \{x_1^i, \dots, x_n^i\}$; $x_j^i \in \{0, 1\}$; $i = 1, \dots, k$; $j = 1, \dots, n$.

Кількість змін значень i -ї змінної у стовпці позначена h_i і визначається в такий спосіб:

$$h_i = \sum_{j=2}^k (x_{i,j-1} \oplus x_{i,j}), \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

У табл. 1 запропоновано табличне подання коду.

Таблиця 1. Множина кодових слів та їх характеристики

Y	X				
	x_1	...	x_j	...	x_n
y_1	x_1^1	...	x_j^1	...	x_n^1
y_2	x_1^2	...	x_j^2	...	x_n^2
...					
y_i	x_1^i	...	x_j^i	...	x_n^i
...					
y_k	x_1^k	...	x_j^k	...	x_n^k
H	h_1	...	h_j	...	h_n

Предметом цього дослідження є коди з одичною відстанню, у яких кодові слова мають такі властивості:

– два сусідніх слова відрізняються тільки в одному розряді, тобто

$$\rho(X^i, X^{i+1}) = 1, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad (2)$$

де ρ – відстань за Хемінгом між кодовими словами X^i та X^{i+1} ;

– загальна кількість змін значень розрядів у кодових словах дорівнює

$$\sum_{j=1}^{k-1} \rho(X^j, X^{j+1}) = k-1. \quad (3)$$

Код, у якому $\rho(X^1, X^k) = 1$, називається циклічним.

Збалансованість коду C визначається в такий спосіб:

$$C = \sum_{i=1}^n \left| h_i - \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{n} \right|. \quad (4)$$

Канонічною формою коду $W(X)$ називається його подання у вигляді

$$W(X) = x_1^1 \dots x_n^1 x_1^2 \dots x_n^2 \dots x_1^k \dots x_n^k.$$

Для компактності двійкова форма подання $W(X)$ може бути перетворена в шістнадцяткову форму.

На першому рівні класифікації розглядаються такі види перетворень: перестановка стовпців (P -перетворення) та інверсія стовпців (N -перетворення). P -перетворення описуються у вигляді множини перестановок стовпців вихідного коду $P = \{\pi_1, \dots, \pi_n\}$, а N -перетворення – у вигляді множини $N = \{n_1, \dots, n_n\}$, де $v_i = 1$, якщо виконується інверсія i -го стовпця, та $v_i = 0$ – в іншому разі. За умови зазначених перетворень зберігається властивість одичної відстані між сусідніми двійковими словами в коді.

Код, отриманий унаслідок групи (P, N)-перетворень коду X , позначається $X(P, N)$, а його канонічна форма – $W(X(P, N))$. Коди X^1 і X^2 називаються PN -еквівалентними, якщо $X^1 = X^2(P, N)$.

У табл. 2 наведені приклади PN -еквівалентних кодів.

Таблиця 2. *PN-еквівалентні коди*

X^1				X^2				X^3				X^4			
x_1^1	x_2^1	x_3^1	x_4^1	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_1^3	x_2^3	x_3^3	x_4^3	x_1^4	x_2^4	x_3^4	x_4^4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1

Множина кодів одичної відстані розбивається на класи еквівалентності $CE_1 - CE_{LPN}$, де LPN – кількість класів еквівалентності першого рівня. Для i -го коду, що міститься в j -му класі еквівалентності X_j^i , визначається його канонічна форма $W(X_j^i)$. Типовий представник j -го класу PN -еквівалентності T_j визначається в такий спосіб:

$$T_j = \min\{W(X_j^i)\}, \quad i=1, \dots, n!2^n; \quad j=1, \dots, LPN.$$

Множина типових представників для групи PN -перетворень позначається $MT = \{T_1, \dots, T_{LPN}\}$.

Множина типових представників для групи PN -перетворень для $n=3$ і $k=8$ містить три елементи: $MT = \{01375462, 01326457, 01326754\}$.

У табл. 3 наведений фрагмент множини типових представників для групи PN -перетворень для $n=4$ і $k=16$.

Таблиця 3. *Множина типових представників для групи PN-перетворень для n=4 і k=16*

№	T	№	T	№	T	№	T
1	013264ceabf75d98	2	013754ce62abfd98	3	0137fb98a26ecd54	4	0137fd54c89bae62
5	013264c89baef75d	6	01326ec457fba89d	7	013762a89d54cefb	8	0137fec8a2645d9b
9	0132675d9bfea8c4	10	01375d9bfe64c8a2	11	01376ec45dfb98a2	12	0137fec8ab9d5462
13	013264cea89bf75d	14	013267fd54c89bae	15	01375d98c462aefb	16	013762ab98c45dfe
17	0132645d98ceabf7	18	01326eab98cdf754	19	013762a89bfecd54	20	0137feab98cd5462
21	01326457fb9dc8ae	22	01326754c8aefb9d	23	01375462abfd98ce	24	01375462aefdc89b
25	0132645dc89baef7	26	013267fec45d98ab	27	01375dfb98a264ce	28	01375dfec462a89b
29	01326457fb98aec	30	01326754cdfb98ae	31	01375462aec89dfb	32	0137645dfec89ba2
33	01326754cd98abfe	34	013267fea8c45d9b	36	013754cdfb98a26e	36	013267feab98cd54
...
325	01326457fdcea89b	326	01326457fec9ba8	327	01326754cefd98ab	328	01326754cefd9ba8

На другому рівні класифікації розглядається множина типових представників MT , сформована на першому рівні. Для кожного типового представника, що містить ця множина, визначається його структура $S(X) = \langle H(X), \leq \rangle$. Типові представники $T_1 - T_{LPN}$ розподіляються на непересічні класи S -еквівалентності. Типові представники T_i і T_j називаються S -еквівалентними, якщо $S(T_i) = S(T_j)$. Унаслідок формується множина типових S -еквівалентних представників, позначена $MS = \{S_1, \dots, S_{NS}\}$, де NS – кількість типових S -еквівалентних представників.

У табл. 4 подана множина типових S -еквівалентних представників для $n=4$ і $k=16$.

Таблиця 4. *Множина типових S-еквівалентних представників для n=4 і k=16*

№	s_1	s_2	s_3	s_4
1	1	2	4	8
2	1	2	5	7
3	1	2	6	6
4	1	3	3	8
5	1	3	4	7
6	1	3	5	6
7	1	4	4	6
8	1	4	5	5
9	2	2	3	8
10	2	2	4	7
11	2	2	5	6
12	2	3	3	7
13	2	3	4	6
14	2	3	5	5
15	2	4	4	5
16	3	3	3	6
17	3	3	4	5
18	3	4	4	4

На третьому рівні класифікації розглядається множина типових представників MS , сформована на другому рівні. Для кожного типового представника, що містить ця множина, визначається його збалансованість $C(S)$. Типові представники S_1, \dots, S_{NS} розподіляються на непересічні класи C -еквівалентності. Типові представники S_i і S_j називаються C -еквівалентними, якщо $C(S_i) = C(S_j)$. Унаслідок формується множина типових C -еквівалентних представників, позначена $MC = \{C_1, \dots, C_{NC}\}$, де NC – кількість типових C -еквівалентних представників.

У табл. 5 наведена множина типових C -еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$.

Характеристики множини типових C -еквівалентних представників для $n = 5$ і $k = 32$ зображені на рис. 2.

Таблиця 5. Множина типових C -еквівалентних представників для $n = 4$ і $k = 16$

C	№	S				LPN
		s_1	s_2	s_3	s_4	
9	1	1	2	4	8	1
	2	1	2	5	7	4
	3	1	2	6	6	3
8,5	4	1	3	3	8	1
	5	2	2	3	8	1
7	6	1	3	4	7	8
	7	1	3	5	6	14
	8	2	2	4	7	2
	9	2	2	5	6	9
6,5	10	2	3	3	7	8
5,5	11	1	4	4	6	10
	12	1	4	5	5	13
5,0	13	2	3	4	6	40
	14	2	3	5	5	22
4,5	15	3	3	3	6	6
3,5	16	2	4	4	5	30
3,0	17	3	3	4	5	50
1,5	18	3	4	4	4	16

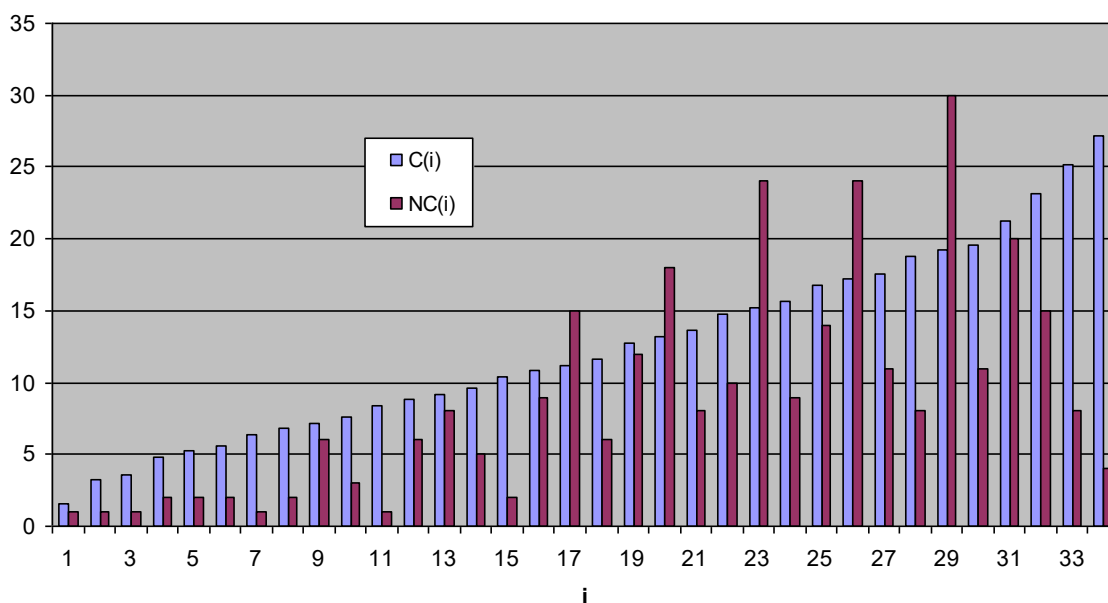


Рис. 2. Характеристики множини типових C -еквівалентних представників для $n = 5$ і $k = 32$

Результати досліджень та їх обговорення

За допомогою описаного методу ієрархічної класифікації енергоефективних кодів побудовано системи типових представників для різних значень n та визначені їх характеристики (табл. 6).

Позначки: V – кількість кодів у класі PN -еквівалентності; NS – кількість типових S -еквівалентних представників; NC – кількість типових C -еквівалентних представників; C_{Gray} –

значення збалансованості коду Грея; C_{min} – мінімальне значення збалансованості кодів.

Таблиця 6. Характеристики досліджених кодів для $n = 3, 4, 5$

n	V	NS	NC	C_{Gray}	C_{min}	C_{Gray}/C_{min}
3	48	3	3	3,3	1,3	2,5
4	384	18	10	9	1,5	6
5	3840	299	34	23,2	1,6	14,5

Наведені результати показують, що кількість типових варіантів кодів з одиначною відстанню значно менша від загальної кількості кодів, що дає змогу обирати оптимальне кодування без перебору варіантів. Ефективність застосування методу зростає із збільшенням кількості розрядів коду. Так, для $n=3$ поліпшення збалансованості оптимальних кодів становить 2,5 рази, 6 разів для $n=4$ та 14,5 рази для $n=5$.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

Розглянуто актуальну проблему зменшення потужності, що розсіюється в глобальних лініях між'єднання за умови збереження високої продуктивності. Показано, що комутаційна активність

є причиною значної частки загальної потужності, що розсіюється. Одним з ефективних методів зниження комутаційної активності під час зв'язку між пристроями або зв'язку на кристалі є застосування методів кодування з низьким енергоспоживанням.

Запропоновано метод ієрархічної класифікації енергоефективних кодів і побудови системи типових представників. Застосування розробленого методу дасть змогу аналізувати та обирати коди із заданими властивостями та отримувати кращі результати з погляду мережних затримок, витрат на електроенергію та інші конструктивні обмеження для комп'ютерних систем.

Подальші дослідження в цьому напрямі: розроблення методу побудови кодів із заданими структурами кодів і побудови перетворювачів кодів.

Список літератури

1. Taha T. B., Barzinjy A. A., Hussain F. H. Nanotechnology and computer science: Trends and advances. *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems*. 2022. Vol. 2. 100011 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100011>
2. Samanth R., Nayak S. G., Nempu P. B. A Novel Multiply-Accumulator Unit Bus Encoding Architecture for Image Processing Applications. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 19. №. 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.1.2391>
3. Chennakesavulu M., Prasad T. J., Sumalatha V. Data encoding techniques to improve the performance of system on chip. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34. №. 2. P. 492–503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.12.003>
4. West D. B. Combinatorial mathematics. Cambridge University Press, 2021. 988 p. DOI: 10.1017/9781107415829
5. Huffman W. C., Kim J. L., Solé P. Concise encyclopedia of coding theory. *Chapman and Hall/CRC*, 2021. 998 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315147901>
6. Стоян Ю. Г., Гребенник И. В. Комбинаторные виды для перечисления комбинаторных конфигураций со специальными свойствами. *Доп. НАН України*. 2010. № 7. С. 28–32. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/29920>
7. Stanley R. P. Enumerative Combinatorics. Vol.1 second edition. Cambridge studies in advanced mathematics. 2011. 440 p.
8. Polya G. Mathematics and plausible reasoning, Volume 1: Induction and analogy in mathematics. Princeton University Press, 2020. 296 p.
9. Charalambides C. A. Enumerative combinatorics. *Chapman and Hall/CRC*, 2018. 632 p. DOI <https://doi.org/10.1201/9781315273112>
10. Strozecki Y. Enumeration complexity. *Bulletin of EATCS*. 2019. Vol. 3. №. 129. URL: <http://bulletin.eatcs.org/index.php/beatcs/article/view/596/605>
11. Lucatero C. R. Combinatorial Enumeration of Graphs. *Probability, Combinatorics and Control*. London, UK: IntechOpen. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.88805
12. Klazar M. Combinatorial Algebraic Counting. Prague. 2022. 51 p.
13. Cameron N. T., Nkwanta A. Riordan matrices and lattice path enumeration. *Not. Am. Math. Soc*. 2023. Vol. 70. P. 231–242. DOI: [10.3390/appliedmath3010012](https://doi.org/10.3390/appliedmath3010012)
14. Zhongmu C. An extension of Burnside theorem. *Acta Math. Sinica*. 1964. Vol. 14. P. 75–77.
15. Harary F., Palmer E. M. Graphical enumeration. *Elsevier*, 2014. 286 p.
16. De Bruijn N. G. Polya's theory of counting. *Applied combinatorial mathematics*. 1964. P. 144–184.
17. Mala F. A. Three Open Problems in Enumerative Combinatorics. *Applied Mathematics and Computation*. 2023. Vol. 7. № 1. P. 24–27. DOI: 10.26855/jamc.2023.03.004
18. Shablya Y., Merinov A., Kruchinin D. Combinatorial Generation Algorithms. *Mathematics*. 2024. Vol. 12. №. 8. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12081207>
19. Стоян Ю. Г., Гребенник И. В. Описание классов комбинаторных конфигураций на основе отображений. *Доп. НАН України*. 2008. № 10. С. 28–31.

20. Yareshchenko, V., Kosenko, V. Coding to reduce the energy of data movement. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава: ПНТУ. 2023. V. 1 (71). P. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>
21. Ярешенко В.В., Косенко В.В. Кодування з низьким енергоспоживанням. *Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: зб. наук. пр. за матеріалами ІХ Всеукр. наук.-практ. конф., 10 листоп. 2023 р.* Полтава: Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. С. 67–68. URL: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14093>
22. Zhang, J., Yang, G., Hung, W. N. A canonical-based NPN Boolean matching algorithm utilizing Boolean difference and cofactor signature. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. C. 27777–27785. DOI 10.1109/ACCESS.2017.2778338

References

1. Taha, T. B., Barzinjy, A. A., Hussain, F. H. (2022), "Nanotechnology and computer science: Trends and advances". *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems*. Vol. 2. 100011 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memori.2022.100011>
2. Samanth, R., Nayak, S. G., Nempu, P. B. (2023), "A Novel Multiply-Accumulator Unit Bus Encoding Architecture for Image Processing Applications". *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. Vol. 19. No. 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.1.2391>
3. Chennakesavulu, M., Prasad, T. J., Sumalatha, V. (2022), "Data encoding techniques to improve the performance of system on chip". *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. Vol. 34. No. 2. P. 492–503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2018.12.003>
4. West, D. B. (2021), "Combinatorial mathematics". *Cambridge University Press*. 988p. DOI: 10.1017/9781107415829
5. Huffman, W. C., Kim, J. L., Solé, P. (2021), "Concise encyclopedia of coding theory". *Chapman and Hall/CRC*. 998 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315147901>
6. Stoyan, Yu. G., Grebennik, I. V. (2010), "Combinatorial types for enumeration of combinatorial configurations with special properties". *Suppl. NAS of Ukraine*. No.7. P. 28–32. available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/29920>
7. Stanley, R. P. (2011), "Enumerative Combinatorics". Vol. 1 second edition. Cambridge studies in advanced mathematics. 440 p.
8. Polya, G. (2020), "Mathematics and plausible reasoning, Volume 1: Induction and analogy in mathematics". Princeton University Press. 296 p.
9. Charalambides, C. A. (2018), "Enumerative combinatorics". *Chapman and Hall/CRC*. 632 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315273112>
10. Strozecki, Y. (2019), "Enumeration complexity". *Bulletin of EATCS*. Vol. 3. No. 129. available at: <http://bulletin.eatcs.org/index.php/beatcs/article/view/596/605>
11. Lucatero, C. R. (2019), "Combinatorial Enumeration of Graphs". *Probability, Combinatorics and Control*. London, UK: IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.88805
12. Klazar, M. (2022), "Combinatorial Algebraic Counting". Prague. 51 p.
13. Cameron, N. T., Nkwanta, A. (2023), "Riordan matrices and lattice path enumeration". *Not. Am. Math. Soc*. Vol. 70. P. 231–242. DOI: 10.3390/appliedmath3010012
14. Zhongmu, C. (1964), "An extension of Burnside theorem". *Acta Math. Sinica*. Vol. 14. P. 75–77.
15. Harary, F., Palmer, E. M. (2014), "Graphical enumeration". *Elsevier*. 286 p.
16. De Bruijn, N. G. (1964), "Polya's theory of counting". *Applied combinatorial mathematics*. P. 144–184.
17. Mala, F. A. (2023). "Three Open Problems in Enumerative Combinatorics". *Applied Mathematics and Computation*. Vol. 7. No. 1. P. 24–27. DOI: 10.26855/jamc.2023.03.004
18. Shablya, Y., Merinov, A., Kruchinin, D. (2024), "Combinatorial Generation Algorithms". *Mathematics*. Vol. 12. No. 8. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12081207>
19. Stoyan, Yu. G., Grebennik, I. V. (2008), "Description of classes of combinatorial configurations based on mappings". *Dop. NAS of Ukraine*. No. 10. P. 28–31.
20. Yareshchenko, V., Kosenko, V. (2023), "Coding to reduce the energy of data movement". *Management, navigation and communication systems*. Collection of scientific works. Poltava: PNTU. Vol. 1 (71). P. 159–162. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1.159>
21. Yareschenko, V. V., Kosenko, V. V. (2023), "Low energy coding". *Electronic and mechatron systems: theory, innovation, practice: Coll. Sciences. BC according to the materials of IX All -Ukrainian. scientific-practical. conf., 10 November*. Poltava: Nat. Univ. Yuri Kondratyuk. P. 67–68. available at: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14093>
22. Zhang, J., Yang, G., Hung, W. N. (2017), "A canonical-based NPN Boolean matching algorithm utilizing Boolean difference and cofactor signature". *IEEE Access*. Vol. 5. P. 27777–27785. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2778338

Відомості про авторів / About the Authors

Ярещенко Владислав Валерійович – Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", аспірант кафедри автоматичної, електроніки та телекомунікацій, Полтава, Україна; e-mail: vlad.yareschenko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7682-0572>

Косенко Віктор Васильович – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка", професор кафедри автоматичної, електроніки та телекомунікацій, Полтава, Україна; Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харків, Україна; e-mail: kosvict@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-8508>

Vladyslav Yareshchenko – National University "Yuri Kondratyuk" Poltava Polytechnic, PhD student at the Department of Automation, Electronic and Telecommunication, Poltava, Ukraine.

Viktor Kosenko – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National University "Yuri Kondratyuk" Poltava Polytechnic, Professor at the Department of Automation, Electronic and Telecommunication, Poltava, Ukraine; Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics, Kharkiv, Ukraine.

LOW-POWER CODING METHOD IN DATA TRANSMISSION SYSTEMS

The object of the study is the Network-on-Chip (NoC) technology, which has become a popular choice for the on-chip communication architecture of modern System-on-Chip (SoC) devices. The **subject matter** of the article is methods of reducing dissipated power in NoC and SoC. The **goal** of the work is: development of a low-power coding method that allows for the efficient transmission or storage of information. The following **tasks** are solved in the article: analysis of classification methods for combinatorial structures, construction a system of typical representatives and analysis of their characteristics. The research **methods** are based on the use of set theory, system theory and combinatorics. The following **results** are obtained: analyzed factors that affect the dissipated power, considered principles of constructing energy-efficient codes. It is shown that switching activity significantly affects the total power and one of the effective methods for reducing switching activity during communication between devices or on-chip communication is the use of low-power coding methods. A method of hierarchical classification of unit distance codes and algorithms for solving step-by-step problems have been developed. The method is based on the invariant approach and construction of a system of different representatives. Estimates of their number have been obtained, characteristics have been determined, and catalogs of typical representatives have been formed. **Conclusions.** The article analyzes factors that affect dissipated power, and considers the principles of constructing energy-efficient codes. A method of hierarchical classification of single distance codes and algorithms for solving step-by-step problems have been developed, and catalogs of typical representatives have been formed. The application of the developed method will allow developers to analyze and select codes with the best properties and, as a result, obtain better results in terms of network delays, energy costs, and other design limitations for computer systems.

Keywords: coding; unit distance codes; energy efficient coding; switching activity; equivalence; classification; enumeration.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ярещенко В. В., Косенко В. В. Метод кодування з низьким енергоспоживанням у системах передачі даних. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>

Yareshchenko, V., Kosenko, V. (2024), "Low-power coding method in data transmission systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.121>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Білодід В. Г.	76
Білоусов М. Ю.	48
Бударін О. С.	104
Горбачов В. О.	57
Калашнікова В. І.	5
Кікоть М. С.	15
Кіріченко Л. О.	76
Коменчук О. В.	29
Косенко В. В.	121
Мазепа А. Д.	76
Макаренко Г. С.	48
Малєєва Ю. А.	15
Малярець Л. М.	104
Нафієв А. Е.	39
Невлюдов І. Ш.	48
Пантелєєв В. О.	76
Пономаренко О. Є.	57
Посашков О. Ю.	64
Радівілова Т. А.	76
Рамал Юсіфов	48
Родіонов А. М.	39
Самойленко В. В.	104
Стародубцев М. Г.	48
Тереник Д.	91
Харченко В. С.	91
Цимбал О. М.	64
Шибанов С. В.	48
Ярещенко В. В.	121
Ястремська О. М.	104

ALPHABETICAL INDEX

Bilodid Volodymyr	76
Bilousov Matvii	48
Budarin Oleksii	104
Gorbachov Valeriy	57
Kalashnikova Vasylysa	5
Kikot Maksym	15
Kirichenko Lyudmyla	76
Komenchuk Oleh	29
Kosenko Viktor	121
Mazepa Artem	76
Makarenko Hennadii	48
Malieieva Julia	15
Malyarets Lyudmyla	104
Nafiev Alan	39
Nevliudov Igor	48
Pantelieiev Vadym	76
Ponomarenko Olha	57
Posashkov Oleh	64
Radivilova Tamara	76
Ramal Yusifov	48
Rodionov Andrii	39
Samoilenko Viktoriia	104
Starodubcev Nikolaj	48
Terenyk Dmytro	91
Kharchenko Vyacheslav	91
Tymbal Oleksandr	64
Shybanov Serhii	48
Yareshchenko Vladyslav	121
Iastremska Olena	104

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

SCIENTIFIC PUBLICATION

**Сучасний стан
наукових досліджень
та технологій
в промисловості**

**Innovative
technologies and
scientific solutions
for industries**

Щоквартальний науковий журнал

Quarterly scientific journal

№ 3 (29), 2024

No. 3 (29), 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*

Responsible secretary of journal *I. Perova*
Responsible for release *A. Kovalenko*
Responsible for licensing *V. Kosenko*
Editor *L. Kuzmina*
Computer layout *L. Svietailo*

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 23,0.
Тираж 150 прим.

Format 60×84/8. Conventional printed sheets 23,0.
Edition of 150 copies.

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.

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.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com

fl. 50, 9, Acad. Bogomolets Str., Kharkiv, 61157,
тел. +38 (063) 993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com