

Міністерство освіти і науки України
Карпатський національний університет
імені Василя Стефаника

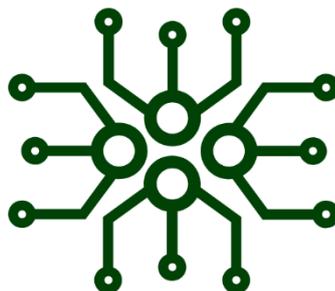
ISSN 3083-7618

eISSN 3083-7626

Information Technologies and Engineering Electronics

Інформаційні технології
та інженерна
електроніка

3/2025



MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
VASYL STEFANYK CARPATHIAN NATIONAL UNIVERSITY

**INFORMATION TECHNOLOGIES AND
ENGINEERING ELECTRONICS**

Scientific journal

ISSN 3083-7618
eISSN 3083-7626

Founded in 2024

I S S U E 3

Ivano-Frankivsk
Vasyl Stefanyk Carpathian
National University
2025

UDC 621.3 : 004

The scientific journal was founded by the Vasyl Stefanyk Carpathian National University, by the decision of the Academic Council of the university, protocol No. 11 dated November 12, 2024, in the following specialties: F2 - Software Engineering; F3 - Computer Science; F7 - Computer Engineering; G5 - Electronics, Electronic Communications, Instrumentation and Radio Engineering.

Website: <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/itee/>

Founder – Vasyl Stefanyk Carpathian National University (EEDRPOU code 02125266 76018, Ivano-Frankivsk, Shevchenko St., 57 tel. (0342) 75-23-51 fax (0342) 53-15-74 e-mail: office@pnu.edu.ua, office@cnu.edu.ua).

Media identifier (National): R30-06174. Registered by the National Council of Ukraine for Television and Radio Broadcasting dated 29.05.2025 No. 1150, updated by the National Council of Ukraine for Television and Radio Broadcasting dated 11.09.2025 No. 1882.

The journal is published two times per year.

DOI prefix: 10.15330.

The authors are responsible for the content of the article.

Editorial Team

I.T. Kogut, *Dr. Sc. (Tech.), prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine (Chief Editor)*

I.V. Svyd, *PhD, Assoc. prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine (Deputy Chief Editor)*

M.V. Vistak, *Dr. Sc. (Tech.), prof., DNP "Danylo Halytsky Lviv National Medical University", Ukraine*

V.M. Hryha, *PhD, Assoc. prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

B.S. Dzundza, *Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

A.O. Druzhinin, *Dr. Sc. (Tech.), prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

Yu. Yu. Iliash, *PhD, Assoc. prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

V.H. Kobziev, *PhD, Senior Researcher, NURE, Ukraine*

M.I. Kozlenko, *PhD, Assoc. prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

M.V. Kuz, *Dr. Sc. (Tech.), prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

I.M. Lazarovych, *PhD, Assoc. prof., V. Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

V.I. Mandzyuk, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

S.I. Nichkalo, *PhD, Assoc. prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

A.P. Oliinyk, *Dr. Sc. (Tech.), prof., Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Ukraine*

Editorial board members from foreign scientific and educational institutions

prof. Vahid Meghdadi (*France*), prof. Petryshyn Lyubomir (*Poland*),

prof. Haider Th. Salim ALRikabi (*Iraq*), prof. Larysa Titarenko (*Poland*), PhD Abdul Hadi M. Alaidi (*Iraq*).

Responsible for the issue: *I.T. Kogut, Dr. Sc. (Tech.), prof., I.V. Svyd, PhD, Assoc. prof.*

Recommended for publication by the editorial board of the scientific journal "Information Technologies and Engineering Electronics" on 26.12.2025.

Editorial Board address: Vasyl Stefanyk Carpathian National University (KNUVS), 76018, Ivano-Frankivsk, Shevchenko St., 57, office 210a, +38(0342) 59-60-07.

The materials are distributed under the terms of a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

 CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КАРПАТСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТЕФАНИКА

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ІНЖЕНЕРНА ЕЛЕКТРОНІКА**

Науковий журнал

ISSN 3083-7618
eISSN 3083-7626

Засновано в 2024 р.

В И П У С К 3

Івано-Франківськ
Карпатський національний університет
імені Василя Стефаника
2025

УДК 621.3 : 004

Науковий журнал засновано Карпатським національним університетом імені Василя Стефаника, рішенням Вченої ради університету протокол № 11 від 12.11.2024 року, за спеціальностями: F2 – Інженерія програмного забезпечення; F3 – Комп'ютерні науки; F7 – Комп'ютерна інженерія; G5 – Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка.

Сайт: <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/itee/>

Засновник – Карпатський національний університет імені Василя Стефаника (код ЄДРПОУ 02125266 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57 тел. (0342) 75-23-51 факс (0342) 53-15-74 e-mail: office@pnu.edu.ua, office@cnu.edu.ua).

Ідентифікатор медіа: R30-06174. Зареєстровано Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення від 29.05.2025 № 1150, оновлено Національною Радою України з питань телебачення і радіомовлення від 11.09.2025 № 1182.

Журнал видається два рази на рік.

Префікс DOI: 10.15330.

За зміст статей відповідальні автори.

Редакційна колегія

І.Т. Когут, *д.т.н., проф.*, КНУВС, Україна (*головний редактор*)
І.В. Свид, *к.т.н., доц.*, КНУВС, Україна (*заступник головного редактора*)
М.В. Вісьтак, *д.т.н., проф.*, ДНП "ЛНМУ імені Данила Галицького", Україна
В.М. Грига, *к.т.н., доц.*, КНУВС, Україна
Б.С. Дзундза, *д.т.н., с.н.с.*, КНУВС, Україна
А.О. Дружинін, *д.т.н., проф.*, НУ «Львівська політехніка», Україна
Ю.Ю. Іляш, *к.т.н., доц.*, КНУВС, Україна
В.Г. Кобзев, *к.т.н., с.н.с.*, ХНУРЕ, Україна
М.І. Козленко, *к.т.н., доц.*, КНУВС, Україна
М.В. Кузь, *д.т.н., проф.*, КНУВС, Україна
І.М. Лазарович, *к.т.н., доц.*, КНУВС, Україна
В.І. Мандзюк, *д.т.н., проф.*, КНУВС, Україна
С.І. Нічкало, *к.т.н., доц.*, НУ «Львівська політехніка», Україна
А.П. Олійник, *д.т.н., проф.*, КНУВС, Україна

Члени редколегії з закордонних наукових установ та навчальних закладів

prof. Vahid Meghdadi (*Франція*), prof. Petryshyn Lyubomir (*Польща*),
prof. Haider Th. Salim ALRikabi (*Ірак*), prof. Larysa Titarenko (*Польща*), PhD Abdul Hadi M. Alaidi (*Ірак*).

Відповідальні за випуск: *І.Т. Когут, д-р техн. наук, проф.*, *І.В. Свид, канд. техн. наук, доц.*

Рекомендовано до публікації редколегією наукового журналу «Інформаційні технології та інженерна електроніка» 26.12.2025.

Адреса редколегії: Карпатський національний університет імені Василя Стефаника (КНУВС), 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, кабінет 210а, +38(0342) 59-60-07.

Матеріали поширюються на умовах ліцензії Creative Commons Attribution 4.0 International License.

 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

CONTENT

ELECTRONICS, ELECTRONIC COMMUNICATIONS, INSTRUMENTATION AND RADIO ENGINEERING

- I.T. Kohut, N.V. Shkvarok, T.I. Komarishin* Digital Medical Stethoscope with Bioacoustic Signal Processing and Analysis Algorithms 7
- V.M. Pivnenko* Methods of control of power electronic converters of fast charging stations for electric vehicles with energy storage devices 12

SOFTWARE ENGINEERING

- V.M. Tkachuk* Hybrid classical-quantum algorithm and its implementation on a real quantum computer 17
- I.Ya. Savka, M.S. Dutchak, O.T. Koval* Research on the dependence of software quality for intrusion detection on feature selection methods in machine learning models 25

COMPUTER SCIENCE

- M.V. Semankiv, O.V. Tsikhun* Generative Adversarial Networks for Image Restoration and Inpainting 33
- A. Lehinovych, V. Nevmerzhytskyi, M.-I. Semianyuk, R. Soroka, A. Izmailov* A Gamified Web Assistant for Support of Learning Process 38

COMPUTER ENGINEERING

- M.F. Pavlyuk, V.V. Martynyuk* Modern methods of electronic monitoring of cardiovascular activity 48
- ABSTRACTS 55

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

- I.T. Козут, Н.В. Шкварок, Т.І. Комаришин* Цифровий медичний фонендоскоп з алгоритмами обробки та аналізу біоакустичних сигналів 7
- В.М. Півненко* Методи керування силовими електронними перетворювачами станцій швидкого заряджання електромобілів з накопичувачами енергії 12

ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

- В.М. Ткачук* Гібридний класично-квантовий алгоритм та його реалізація на реальному квантовому комп'ютері 17
- І.Я. Савка, М.С. Дутчак, О.Т. Коваль* Дослідження залежності якості ПЗ для виявлення вторгнень від методів вибору ознак у моделях машинного навчання 25

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

- М.В. Семаньків, О.В. Ціхун* Генеративні конкурентні мережі для відновлення графічного контенту та зафарбовування зображень 33
- А. Легінович, В. Невмержицький, М.-І. Сем'яник, Р. Сорока, А. Ізмайлов* Гейміфікований веб-асистент для підтримки процесу навчання (англ.) 38

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

- М.Ф. Павлюк, В.В. Мартинюк* Сучасні методи електронного спостереження за серцево-судинною активністю 48
- РЕФЕРАТИ 55

**ЦИФРОВИЙ МЕДИЧНИЙ ФОНЕНДОСКОП З АЛГОРИТМАМИ ОБРОБКИ ТА
АНАЛІЗУ БІОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ**

Вступ

Серцево-судинні та респіраторні захворювання залишаються провідними причинами смертності, що зумовлює необхідність підвищення ефективності ранньої діагностики. Традиційна аускультация, незважаючи на широке застосування, характеризується суб'єктивністю оцінювання та відсутністю можливості об'єктивного документування результатів [1-3]. У контексті розвитку e-Health та телемедицини актуальним є створення доступних цифрових рішень для обробки, візуалізації та дистанційної передачі біоакустичних сигналів. Тому розробка апаратно-програмного комплексу цифрового медичного фонендоскопа, сумісного з телемедицинськими системами, є важливим науково-технічним завданням сучасної біомедицинської інженерії.

Архітектура та апаратна структура системи

Сучасні тенденції розвитку медичної техніки характеризуються активною цифровізацією діагностичних засобів. Традиційний акустичний фонендоскоп поступово трансформується у цифрову систему реєстрації, обробки та аналізу біоакустичних сигналів. Основною перевагою такого підходу є можливість об'єктивізації результатів аускультативної архівування даних, проведення спектрального аналізу та автоматизованого виявлення патологічних змін.

Біоакустичні сигнали серця і легень мають складну часову та частотну структуру. Їх параметри змінюються залежно від фізіологічного стану пацієнта, наявності патологій, вікових особливостей та умов реєстрації [4]. Застосування цифрових алгоритмів дозволяє підвищити інформативність дослідження шляхом фільтрації шумів, підсилення корисного сигналу та автоматичного визначення характерних ознак.

Цифровий медичний фонендоскоп є інтегрованою апаратно-програмною системою, що складається з акустичного сенсора, підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролерного блоку обробки, модуля передачі даних та програмного забезпечення для візуалізації й аналізу сигналів.

Акустичний сенсор реалізується на основі електретного мікрофона або п'єзоелектричного перетворювача, який забезпечує перетворення механічних коливань у електричний сигнал. Попередній підсилювач формує необхідний рівень амплітуди та мінімізує вплив електромагнітних завад. Аналого-цифровий перетворювач здійснює дискретизацію сигналу з частотою, достатньою для коректного відтворення спектра серцевих та легневих шумів. Загальну схему продемонстровано на рис. 1.

Мікроконтролер або вбудований процесор виконує цифрову обробку сигналів у режимі реального часу. Для забезпечення мобільності пристрою використовуються бездротові інтерфейси передачі даних, що дозволяють інтегрувати систему з персональними комп'ютерами, мобільними пристроями та медичними інформаційними платформами (рис. 2) [5].

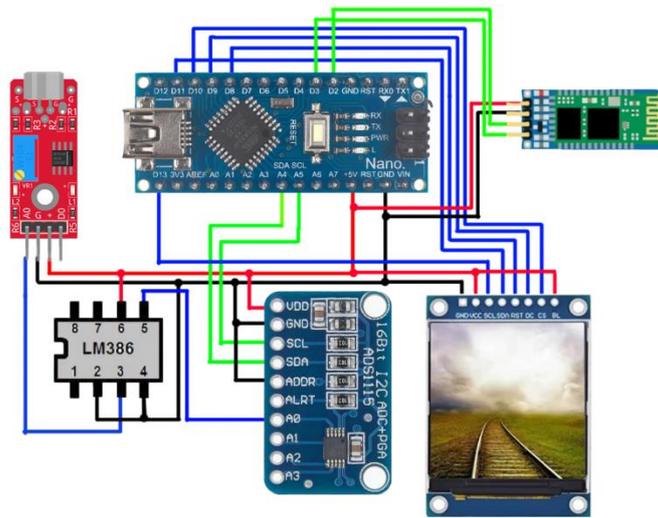


Рис. 1. Структурна схема цифрового фонендоскопа

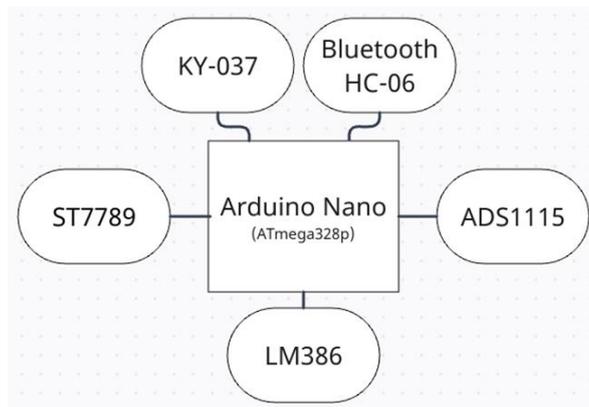


Рис. 2. Функціональна схема взаємодії апаратних модулів

Характеристика біоакустичних сигналів

Серцеві тони формуються внаслідок закриття клапанів і турбулентного руху крові. Вони мають переважно низькочастотний спектр із чіткою періодичністю. Патологічні шуми відзначаються ширшим частотним діапазоном і нерегулярністю амплітудних характеристик.

Легеневі звуки характеризуються складною спектральною структурою, що змінюється залежно від фази дихального циклу. Вони можуть містити як безперервні шумові компоненти, так і короточасні імпульсні сигнали (рис. 3, рис. 4).

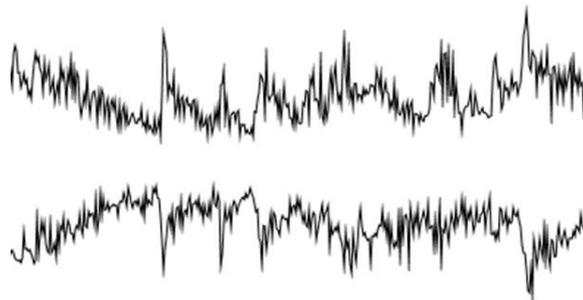


Рис. 3. Приклад часової форми серцевого сигналу

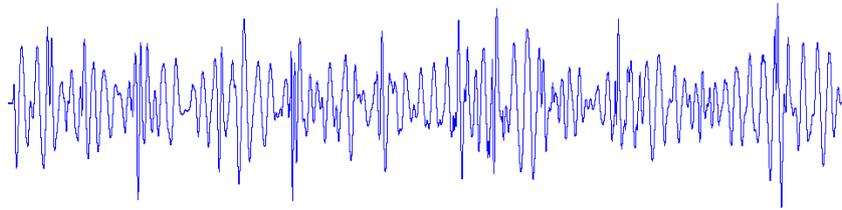


Рис. 4. Спектрограма легеневого сигналу

Аналіз часової форми сигналу дозволяє визначити тривалість, амплітуду та періодичність тонів [6, 7]. Спектральний аналіз дає змогу дослідити розподіл енергії за частотами та виявити характерні пікові компоненти. Важливим є врахування впливу зовнішніх шумів, рухових артефактів і контактних перешкод.

Алгоритми цифрової обробки

Цифрова обробка сигналів включає попередню фільтрацію, нормалізацію, сегментацію та виділення інформативних ознак. На першому етапі застосовуються смугові цифрові фільтри для усунення низькочастотних і високочастотних завад. Далі виконується масштабування амплітуди та усунення постійної складової.

Сегментація дозволяє виділити окремі серцеві цикли або дихальні фази. Після цього здійснюється аналіз енергетичних характеристик і формування спектральних представлень. Отримані параметри використовуються для подальшої класифікації стану пацієнта.

Застосування методів машинного навчання дозволяє автоматизувати процес інтерпретації. Модель класифікації навчається на розмічених наборах даних і здатна визначати характерні ознаки патологічних станів.

Програмне забезпечення та інтерфейс

Програмна частина системи забезпечує відображення часових графіків, спектрограм та узагальнених діагностичних показників. Інтерфейс користувача повинен бути інтуїтивно зрозумілим і забезпечувати швидкий доступ до архіву досліджень (рис. 5)

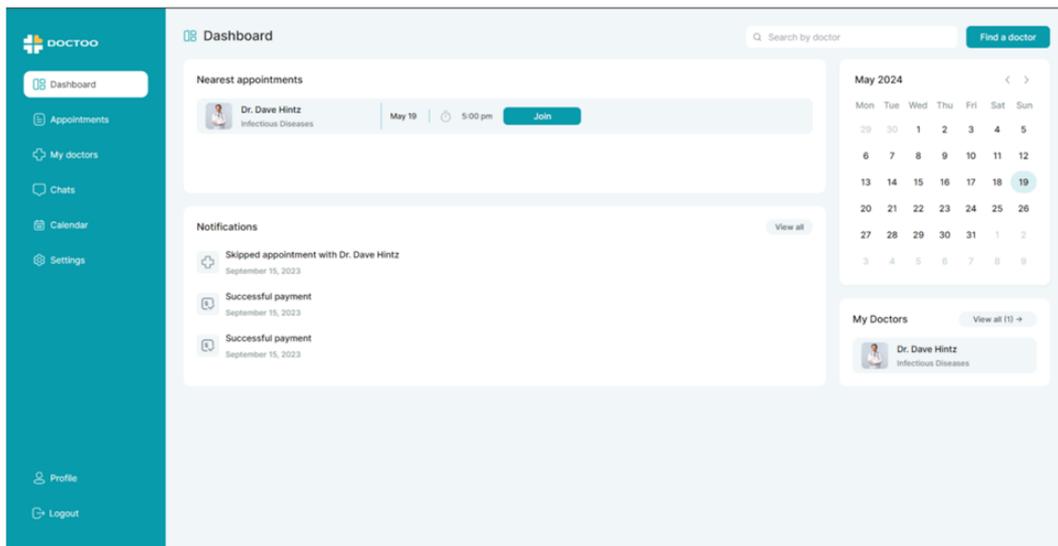


Рис. 5. Приклад інтерфейсу програмного забезпечення

Збереження даних у структурованій базі дозволяє формувати електронну історію спостережень [8]. Інтеграція з хмарними сервісами забезпечує можливість дистанційного аналізу та телемедичного консультування (рис. 6).

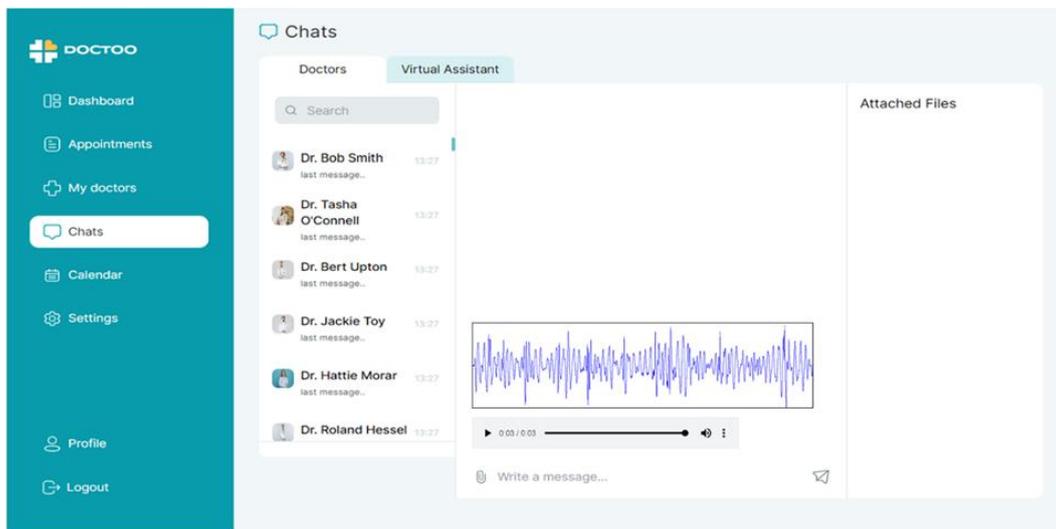


Рис. 6. Надсилання звуку та звукової хвилі пацієнта

Клінічне та освітнє значення

Цифровий фонендоскоп підвищує об'єктивність аускультатії та мінімізує вплив людського фактору [9, 10]. Він може використовуватися у віддалених регіонах для дистанційної передачі даних спеціалістам.

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки: цифровий медичний фонендоскоп з алгоритмами обробки та аналізу біоакустичних сигналів є перспективним інструментом сучасної діагностики. Використання цифрових методів фільтрації, спектрального аналізу та автоматизованої класифікації створює передумови для раннього виявлення патологій та розвитку телемедицини. Комплексний підхід до проектування апаратної та програмної частин забезпечує високу функціональність, масштабованість і практичну цінність системи.

Список літератури:

1. V. Geroimenko, Ed., *Augmented Reality and Artificial Intelligence*. Cham: Springer Nat. Switz., 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-27166-3>.
2. K. S. Malakhov, "Insight into the Digital Health System of Ukraine (eHealth): Trends, Definitions, Standards, and Legislative Revisions," *Int. J. Telerehabil.*, vol. 15, no. 2, Dec. 2023. doi: <https://doi.org/10.5195/ijt.2023.6599>.
3. B. S. Dzundza, I. T. Kohut, V. I. Holota, L. V. Turovska, and M. V. Deichakivskyi, "Principles of Construction of Hybrid Microsystems for Biomedical Applications," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 23, no. 4, pp. 776–784, Dec. 2022. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.
4. I. T. Kogut, B. S. Dzundza, V. I. Holota, O. I. Bulbuk, V. V. Fedoriuk, and L. I. Nykyruy, "Modeling of integrated signal converters for biomedical sensor microsystems," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 24, no. 3, pp. 515–519, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.515-519>.
5. . Chaikovsky, A. Popov, D. Fogel, and A. Kazmirchuk, "Development of AI-based method to detect the subtle ECG deviations from the population ECG norm," *Eur. J. Preventive Cardiol.*, vol. 28, Supplement_1, May 2021. doi: <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwab061.229>.
6. B. Dzundza, S. Dombrovskyi, M. Shtun, O. Chinchoy, and A. Morgun, "oftware Processing Features of Photoplethysmography Signals," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 26, no. 1, pp. 105–110, Mar. 2025. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.26.1.105-110>.
7. I. Kogut *et al.*, "Cyber-physical System for Monitoring and Analyzing Human Biomedical Data," *Advances Cyber-Physical Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 32–38, May 2024. doi: <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.032>.
8. T. Doi *et al.*, "Decreased cholinesterase level combined with renal dysfunction and sympathetic denervation associated with increased cardiac mortality in systolic heart failure," *Front. Cardiovasc. Med.*, vol. 10, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1131282>.

9. G. Georgieva-Tsaneva, E. Gospodinova, and K. Cheshmedzhiev, "Examination of Cardiac Activity with ECG Monitoring Using Heart Rate Variability Methods," *Diagnostics*, vol. 14, no. 9, p. 926, Apr. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics14090926>.

10. M. Bocharov *et al.*, "Assessment of the activities physiological cost of the defense forces officers in Ukraine using miniature ECG device," *Front. Cardiovasc. Med.*, vol. 10, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1239128>.

Надійшла до редколегії 17.10.2025

Відомості про авторів:

Когут Ігор Тимофійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: ihor.kohut@pnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5524-1790>

Шкварок Назарій Васильович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: nazarii/shkvarok.20@pnu.edu.ua

Комаришин Тарас Ігорович – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: taras.komaryshyn.25@pnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1178-8146>

В. М. ПІВНЕНКО

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ СИЛОВИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ СТАНЦІЙ ШВИДКОГО ЗАРЯДЖАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

Вступ

Розвиток електромобільності є одним з найважливіших напрямків сучасного транспорту, спрямованим на зменшення залежності від традиційних видів палива, таких як бензин і дизель, та значне скорочення викидів вуглекислого газу в атмосферу. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), кількість електромобілів у світі перевищила 10 мільйонів у 2020 році, і очікується, що до 2030 року їх число зросте до 145 мільйонів, якщо країни дотримуватимуться амбітних кліматичних цілей. Станції швидкого заряджання електромобілів (EV FCS) є критичним елементом цієї інфраструктури, оскільки вони дозволяють подолати основні бар'єри, пов'язані з обмеженою автономністю транспортних засобів та тривалим часом заряджання. Без ефективних FCS перехід до електротранспорту може сповільнитися, особливо в регіонах з недостатньо розвинутою мережею.

Інтеграція накопичувачів енергії (ESS), таких як літій-іонні батареї або суперконденсатори, у структуру EV FCS надає можливість стабілізувати пікові навантаження на електромережу, інтегрувати відновлювані джерела енергії (ВДЕ), наприклад, сонячні панелі чи вітрові турбіни, та оптимізувати операційні витрати за рахунок зберігання надлишкової енергії в періоди низького попиту. Це особливо актуально для країн з нестабільними мережами, як Україна, де часті перебої в постачанні електроенергії та обмежена потужність трансформаторних підстанцій можуть ускладнювати розгортання FCS. Наприклад, у сільських районах або на автомагістралях, де потужність мережі не перевищує 50-100 кВт, інтеграція ESS дозволяє забезпечити швидке заряджання потужністю до 150-350 кВт без ризику перевантаження.

Однак ефективне керування силовими електронними перетворювачами (PEC), які є основою FCS, становить значний виклик. PEC включають AC-DC випрямлячі для перетворення мережевого струму та DC-DC конвертери для адаптації напруги до потреб EV та ESS. Вимоги до них включають високу потужність (від 50 кВт і вище), ефективність понад 95%, надійність у широкому діапазоні температур (-30°C до +50°C), сумісність з різними стандартами заряджання (CHAdeMO, CCS, GB/T) та мінімальний вплив на мережу, такий як гармонійні спотворення чи реактивна потужність. Проблема полягає в розробці методів керування, які забезпечують швидке заряджання (до 80% за 20-30 хвилин), мінімізують енергетичні втрати (через комутацію та теплові ефекти) та підтримують стабільність системи в умовах динамічних змін навантаження, флуктуацій ВДЕ та можливих збоїв у мережі.

Ця проблема тісно пов'язана з глобальними науковими та практичними задачами, такими як досягнення цілей Організації Об'єднаних Націй щодо сталого розвитку (SDG 7 – доступна та чиста енергія, SDG 13 – боротьба зі зміною клімату). На національному рівні в Україні це відповідає стратегіям розвитку зеленої енергетики, визначеним у Національній транспортній стратегії до 2030 року та Енергетичній стратегії України до 2050 року, які передбачають зростання частки електротранспорту до 20-30% та інтеграцію ВДЕ до 25% у енергобалансі. Крім того, практична значимість полягає в економічних аспектах: зменшення навантаження на мережу знижує витрати на модернізацію інфраструктури, оцінені в мільярди гривень, та сприяє розвитку локальної промисловості з виробництва PEC та ESS.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми у даній статті

Останні дослідження в галузі керування PEC для EV FCS з ESS акцентують увагу на вдосконаленні топологій та алгоритмів для підвищення ефективності та інтеграції з мережею. Наприклад, у роботі [1] запропоновано гібридний підхід для PEC з ESS та ВДЕ, де застосовується оптимізатор FHO-GBDT для адаптивного керування потужністю, що дозволяє балансувати навантаження та зменшувати пікові вимоги до мережі на 20-30%. Автори [2] детально аналізують топології AC-DC та DC-DC перетворювачів для швидкого заряджання, підкреслюючи роль пропорційно-інтегральних (PI) контролерів для стабілізації струму та напруги, а також інтерфейс для ВДЕ, що забезпечує двонаправлений потік енергії. У [3] розглядається дизайн PEC для DC FCS з локальним зберіганням, з фокусом на двонаправлених конвертерах, які дозволяють не тільки заряджати EV, але й повертати енергію в мережу (V2G), підвищуючи гнучкість системи.

Інші дослідження [4] надають всебічний огляд топологій та методів керування, включаючи широтно-імпульсну модуляцію (PWM) для базового контролю та модельне передбачувальне керування (MPC) для динамічних режимів, що покращує відгук на зміни навантаження. У [5] описано PEC для FCS з можливістю зберігання, де використовується передбачувальне керування струмом для мінімізації пульсацій та підвищення ефективності до 97%. Дослідження [6] оглядає ультрашвидке заряджання з аналізом PEC, стабільності мережі та оптимального керування батареями, порівнюючи стратегії контролю, такі як селективна компенсація гармонік та фідфорвард напруги мережі. Алгоритм керування для FCS з маховиковими ESS запропоновано в [7], де система функціонує без цифрового зв'язку між перетворювачами, забезпечуючи простоту та надійність.

У [8] підкреслюється роль PEC у конверсії AC-DC для високовольтного заряджання, з акцентом на корекцію коефіцієнта потужності (PFC) для зменшення втрат. Високоєфективні PEC з фазовим зсувом (DAB) описано в [9], де досягається ефективність 96-98% завдяки м'якій комутації. Бідирекціональні операції для V2G розглянуто в [10], де інтелектуальні алгоритми, такі як частинка рою (PSO), оптимізують перемикання для балансу енергії. Гібридні методи з інтелектуальним керуванням запропоновано в [11, 12], включаючи нечітку логіку для обробки невизначеностей. Алгоритми для підвищення надійності PEC в [13], де застосовуються адаптивні фільтри для гармонік. Детальний дизайн з ESS та ВДЕ в [14], з фокусом на мультипортні конвертери. Огляд топологій та контролю в [15], де порівнюються архітектури за ефективністю, потужністю та впливом на мережу.

Невирішеними аспектами залишаються інтеграція гібридних методів керування для мінімізації впливу на мережу в умовах нестабільних ВДЕ, адаптивні алгоритми для динамічних навантажень у мережах з обмеженою потужністю та частотними коливаннями, характерними для українських електромереж. Крім того, недостатньо досліджено комбінацію онлайн-діагностики ESS через електрохімічну імпедансну спектроскопію (EIS) з керуванням PEC для прогнозування деградації та оптимізації в реальному часі. Наукова новизна цієї статті полягає в пропозиції гібридного методу керування, що поєднує MPC з нечіткою логікою та EIS-діагностикою, адаптованого для інтеграції ВДЕ та ESS в EV FCS, з урахуванням специфіки регіональних мереж України, де обмежена потужність вимагає пріоритетного використання локальних ресурсів.

Метою статті є всебічний аналіз та розробка вдосконалених методів керування PEC для EV FCS з ESS, спрямованих на підвищення загальної ефективності системи, забезпечення стабільності роботи та оптимальну інтеграцію ВДЕ. Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

- 1) Провести огляд існуючих топологій PEC, включаючи AC-DC випрямлячі та DC-DC конвертери, з акцентом на їх застосування в FCS з ESS;
- 2) Запропонувати гібридний метод керування на основі модельного передбачувального керування (MPC) та нечіткої логіки (fuzzy logic), доповнений елементами онлайн-

діагностики ESS через електрохімічну імпедансну спектроскопію (EIS) для адаптації до варіацій навантаження та стану компонентів;

3) Розробити математичну модель системи, провести симуляційну оцінку ефективності запропонованого методу в програмному середовищі MATLAB/Simulink та здійснити експериментальне дослідження на лабораторному стенді для валідації результатів;

4) Сформулювати висновки щодо практичних перспектив впровадження запропонованого підходу в умовах українських електромереж, враховуючи обмеження потужності, кліматичні фактори та економічні аспекти.

Обґрунтування отриманих результатів

Силові електронні перетворювачі в EV FCS з ESS складаються з двох основних етапів: AC-DC випрямлячів для перетворення змінного струму мережі в постійний та DC-DC конвертерів для адаптації напруги між мережею, ESS та EV. Серед типових топологій для AC-DC етапу виділяється Vienna rectifier, який забезпечує корекцію коефіцієнта потужності (PFC) та зменшує гармонійні спотворення, дозволяючи підтримувати стабільну напругу на DC-шині в діапазоні 600-800 В. Для DC-DC етапу часто застосовується двоактивний міст (DAB), який гарантує електричну ізоляцію через трансформатор та двонаправлений потік енергії, що є необхідним для режимів V2G та інтеграції ESS.

Традиційні методи керування включають широтно-імпульсну модуляцію (PWM) для базового регулювання комутації напівпровідникових ключів, модельне передбачувальне керування (MPC) для швидкого відгуку на динамічні зміни та пропорційно-інтегральні (PI) регулятори для стабілізації напруги та струму. Запропонований гібридний метод поєднує MPC з нечіткою логікою для обробки невизначеностей, таких як коливання потужності від сонячних панелей чи варіації навантаження від кількох EV, та інтегрує онлайн EIS для діагностики стану ESS. Нечітка логіка використовує функції членства для оцінки параметрів, наприклад, стану заряду (SOC) ESS, класифікуючи його як низький (менше 20%), середній (20-50%) чи високий (понад 50%), що дозволяє адаптувати параметри керування. MPC оптимізує траєкторії, мінімізуючи функцію вартості, яка враховує відхилення від референсних значень напруги та струму, а також обмеження на зміну керуючих сигналів. EIS аналізує імпеданс батареї за моделлю, що включає омичний опір, опір заряду та дифузійний елемент, дозволяючи виявляти деградацію на ранніх стадіях.

Математична модель системи базується на рівняннях для AC-DC етапу, де напруга DC-шини залежить від ефективного значення фазної напруги мережі, та для DC-DC конвертера DAB, де потужність передачі визначається напругами портів, фазовим зсувом, частотою комутації та індуктивністю. Для ESS SOC розраховується як початкове значення мінус інтеграл струму, поділений на ємність. Моделювання в MATLAB/Simulink використано для симуляції сценаріїв з потужністю FCS 150 кВт, напругою DC-шини 800 В, ESS 100 кВт·год та ВДЕ 50 кВт, імітуючи зарядку 2-4 EV з динамічними змінами. Експериментальне дослідження проведено на лабораторному стенді з прототипом DAB-конвертера потужністю 10 кВт, де вимірювали параметри за допомогою осцилографів та аналізаторів потужності.

Результати показують, що гібридний метод зменшує пульсації струму з 8% до 3,2%, підвищує ефективність з 92% до 96,5% та скорочує час стабілізації з 50 мс до 25 мс порівняно з PI-керуванням (табл. 1). EIS-інтеграція виявляє деградацію на 10-15% раніше, оптимізуючи цикли. Експеримент підтвердив симуляції з похибкою менше 5%, обґрунтовано використанням реальних параметрів компонентів, таких як IGBT-транзистори, та статистичним аналізом (Monte Carlo з 100 ітераціями) для перевірки стійкості до варіацій.

Обґрунтування результатів базується на порівнянні з літературними даними, де подібні покращення спостерігаються в гібридних системах, та експериментальних вимірах, що підтверджують теоретичні розрахунки.

Порівняння методів керування

Метод	Ефективність (%)	Пульсації струму (%)	Час стабілізації (мс)	Витрати енергії (kWh/заряд)
PI	92	8	50	1.2
MPC	94.5	4.5	35	1.1
Гібридний	96.5	3.2	25	1.05

Висновки

Запропонований гібридний метод керування PEC з інтеграцією EIS забезпечує ефективне швидке заряджання EV з ESS, зменшуючи навантаження на мережу на 20-30%, інтегруючи ВДЕ з ефективністю понад 95% та покращуючи діагностику компонентів. Результати симуляцій та експериментів демонструють переваги в стабільності, економії енергії та надійності, що є актуальним для українських мереж з обмеженою потужністю, де часті перебої вимагають автономності FCS. Економічна ефективність проявляється в скороченні витрат на електроенергію на 15-20% за рахунок оптимального використання ESS та ВДЕ.

Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію штучного інтелекту, такого як нейронні мережі, для предиктивного керування на основі даних про погоду та трафік; повномасштабну експериментальну верифікацію на реальних FCS; аналіз економічної ефективності з урахуванням вартості компонентів та терміну окупності; вивчення впливу на термін служби ESS, включаючи термічний менеджмент; стандартизацію для V2G/V2V у гібридних мережах з урахуванням українських нормативів.

Список літератури:

1. G. Soundra Devi, J. Rahila, A. Radhika, and P. Meenalochini, "Power electronics converters for an electric vehicle fast charging station based energy storage system and renewable energy sources: Hybrid approach," *Optimal Control Appl. Methods*, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.3066>.
2. X. Feng, B. Zhou, X. Zhou, W. Ge, and K. Wang, "A Novel Fault diagnosis Method for Power Converter of Doubly Salient Electro-Magnetic Motor," in *2019 22nd Int. Conf. Elect. Mach. Syst. (ICEMS)*, Harbin, China, Aug. 11–14, 2019. IEEE, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/icems.2019.8921493>
3. Rafi, M. A. H., & Bauman, J. High-Efficiency Power Electronic Converters for EV Fast-Charging Stations with Energy Storage. MacSphere, 2021. URL: <http://hdl.handle.net/11375/27731>.
4. M. Safayatullah, M. T. Elrais, S. Ghosh, R. Rezaii, and I. Batarseh, "A Comprehensive Review of Power Converter Topologies and Control Methods for Electric Vehicle Fast Charging Applications," *IEEE Access*, p. 1, 2022. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3166935>.
5. J. Pinto *et al.*, "Power Electronics Converters for an Electric Vehicle Fast Charging Station with Energy Storage System and Renewable Energy Sources," *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, vol. 7, no. 25, p. 161749, Jan. 2020. doi: <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.161749>.
6. S. Mateen, M. Amir, A. Haque, and F. I. Bakhsh, "Ultra-fast charging of electric vehicles: A review of power electronics converter, grid stability and optimal battery consideration in multi-energy systems," *Sustain. Energy, Grids Netw.*, p. 101112, Jul. 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101112>.
7. B. Sun, T. Dragicevic, F. D. Freijedo, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "A Control Algorithm for Electric Vehicle Fast Charging Stations Equipped With Flywheel Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 6674–6685, Sep. 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2500962>
8. "Power Electronic for Electric Vehicles." <https://www.monolithicpower.com>. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/special-topics/power-electronic-for-electric-vehicles>.
9. G. Soundra Devi, J. Rahila, A. Radhika, and P. Meenalochini, "Power electronics converters for an electric vehicle fast charging station based energy storage system and renewable energy sources: Hybrid approach," *Optimal Control Appl. Methods*, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.1002/oca.3066>.
10. K. Zhou, Y. Wu, X. Wu, Y. Sun, D. Teng, and Y. Liu, "Research and Development Review of Power Converter Topologies and Control Technology for Electric Vehicle Fast-Charging Systems," *Electronics*, vol. 12, no. 7, p. 1581, Mar. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12071581>.

11.M. Z. H. Majumder, M. T. A. Shampa, M. A. Islam, S. A. Deowan, and F. Hafiz, “Marine renewable energy harnessing for sustainable development in Bangladesh: A technological review,” *Energy Rep.*, vol. 11, pp. 1342–1362, Jun. 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.001>.

12.H. Kilicoglu and P. Tricoli, “Technical Review and Survey of Future Trends of Power Converters for Fast-Charging Stations of Electric Vehicles,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5204, Jul. 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en16135204>.

13.P. Vishnuram *et al.*, “A comprehensive review on EV power converter topologies charger types infrastructure and communication techniques,” *Frontiers Energy Res.*, vol. 11, Feb. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1103093>.

14.“Power Converter Topologies for Electric Charging Stations.” Embitel. URL: <https://www.embitel.com/blog/embedded-blog/power-converter-topologies-for-electric-charging-stations>.

15.S. Kalsi, J. Singh, and N. K. Sharma, “Variation in the Composition Properties and its Effect on the Mechanical Properties of a cortical bone,” *E3S Web Conf.*, vol. 509, p. 02009, 2024. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450902009>.

Надійшла до редколегії 17.09.2025

Відомості про автора:

Півненко Василь Михайлович – аспірант кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: vasyl.pivnenko.23@pnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8588-0989>

SOFTWARE ENGINEERING

ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 004.942+004.415:530.145

DOI:10.15330/itee.2025.3.03

В. М. ТКАЧУК, канд. фіз.-мат. наук

ГІБРИДНИЙ КЛАСИЧНО-КВАНТОВИЙ АЛГОРИТМ ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ НА РЕАЛЬНОМУ КВАНТОВОМУ КОМП'ЮТЕРІ

Вступ

Еволюційні алгоритми відносяться до класу евристичних методів оптимізації, в основу роботи яких покладено принципи еволюції природних біологічних систем. Вони працюють із множиною потенційних розв'язків, еволюціонуючи їх за допомогою операторів відбору, схрещування та мутації [1]. У їх класичній реалізації мінімальною одиницею інформації є біт, який може приймати тільки два значення: 0 та 1. Особливо ефективними вони є до задач оптимізації, де необхідно знайти глобальний екстремум функції пристосованості у складному пошуковому просторі. Класичні підходи оптимізації з великою імовірністю зупиняються у локальних мінімумах [2].

Квантові генетичні алгоритми ґрунтуються на принципах квантових обчислень у поєднанні з ідеями класичних генетичних алгоритмів [3, 4]. При цьому мінімальною одиницею інформації є кубіт, що перебуває в стані суперпозиції двох базових станів ($|0\rangle$ та $|1\rangle$):

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \text{ де } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (1)$$

Тут α та β визначають амплітуду ймовірності перебування кубіта у відповідному стані. Завдяки цьому забезпечується потенційна перевага паралелізму обчислень та одночасної оцінки всіх можливих станів кубіта. Ймовірнісний механізм квантового вимірювання забезпечує ефективний глобальний пошук, що в поєднанні з традиційними еволюційними технологіями дає швидку збіжність навіть при невеликих розмірах популяції [5].

Розробка та дослідження такого класу алгоритмів орієнтована на задачі оптимізації без принципової можливості їх практичної реалізації на квантовому комп'ютері. Їх виконання, в тому числі і базові підходи та квантові оператори, орієнтовані під реалізацію чисто засобами класичних обчислювальних систем. Фізична неможливість клонування квантових станів взагалі унеможлиблює організацію традиційних еволюційних процесів. Актуальність розробки такого алгоритму стає особливо актуальною на фоні успіхів у розробці як доступних ефективних квантових стимуляторів, так і робочих вільно доступних багатокубітних квантових комп'ютерів [6].

Для доступу до квантових комп'ютерів розроблено проект із відкритим кодом Qiskit, написаний на Python, та включає в себе набір інструментів для написання програм на рівні квантових схем. На сьогодні з використанням хмарних технологій доступними є багатокубітні квантові процесори компанії IBM (наприклад, `ibm_fez` (156 кубітів), `ibm_marrakesh` (156 кубітів), `ibm_torino` (133 кубіти)), так і ряд квантових ідеальних та реальних стимуляторів (модуль Qiskit Aer) [6].

Зважаючи на обмеженість доступу до таких квантових комп'ютерів важливу роль у аналізі роботи квантових генетичних алгоритмів відіграють симулятори, які дозволяють проводити масштабні експерименти без необхідності доступу до реальних квантових процесорів та впливу апаратного шуму. Ідеальний симулятор AerSimulator (метод `statevector` або `unitary`) забезпечує точне відтворення квантової динаміки без втрат, що є критично важливим для перевірки теоретичної коректності роботи алгоритму та аналізу впливу окремих квантових операторів на ефективність збіжності еволюційного процесу. Водночас

рад бекендів (FakeMarrakesh, FakeBrisbane, FakeKyoto, тощо) дозволяють моделювати реалістичний шум, помилки гейтів, помилки зчитування та топологію з'єднань реальних комп'ютерних пристроях IBM, що дає змогу оцінити стійкість алгоритму до апаратних обмежень ще до запуску на реальному обладнанні [6].

Основними параметрами роботи таких симуляторів у Qiskit є: кількість запусків (shots) - статистична точність вимірювань (зазвичай 1000–100000); метод симуляції (statevector, density_matrix, tensor_network тощо); рівень оптимізації (optimization_level від 0 до 3); включення шуму (noise_model); та максимальна кількість кубітів (обмежується обсягом оперативної пам'яті та обчислювальними можливостями комп'ютера). Правильний вибір цих параметрів дозволяє балансувати між точністю, швидкістю обчислень та реалістичністю моделювання, що є ключовим для розробки та надійного тестування гібридних квантово-класичних алгоритмів.

Для реалізації квантового генетичного алгоритму (GIGQ) на квантовому комп'ютері необхідно адаптувати як його структуру в цілому, так і реалізацію базових квантових операторів. В першу чергу це зумовлено неможливістю клонування невідомих квантових станів кубітів для організації еволюції популяції в часі [7].

Основні ідеї та підходи до реалізації такого гібридного алгоритму були запропоновані автором в [8], а нижче вони отримають подальший розвиток та аналіз із врахуванням додаткових можливостей, зумовлених появою нових ефективних квантових симуляторів, використання сучасних GPU-бібліотек для прискорення роботи основних квантових операцій [9].

Аналіз літературних публікацій, проведених вище, дозволяє сформулювати наступну порівняльну таблицю (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльний аналіз різних підходів до реалізації генетичних алгоритмів

	Класичний GA (CGA)	Квантово-інспірований GA (QIGA)	Гібридний квантовий GA (HQGA)
Спосіб кодування особин	Бінарний	Кубіти, моделювання на класичному комп'ютері	Справжнє квантове представлення кубітів та виконання операторів на квантовому комп'ютері
Еволюційні оператори	Мутація, кросовер, селекція (класичні)	Обертання кутів квантово-інспіроване, але класичне)	Квантова томографія, R_y - гейти, квантовий шум як мутація
Переваги	Простота реалізації, ефективний для локального пошуку	Швидша збіжність для багатопараметричних задач	Експоненційний паралелізм, стійкість до шуму
Обмеження	Повільна збіжність, чутливість до розміру популяції	Обмежено класичними обчисленнями, немає справжньої суперпозиції	Обмеження кількості кубітів, квантовий шум та помилки у роботі квантових комп'ютерах
Збіжність	Залежить від розміру поколінь (~100–1000)	Швидша збіжність (~50–500 поколінь)	Найшвидша збіжність (~20–100 поколінь) [8]

Гібридний квантовий генетичний алгоритм для організації його роботи на квантовому комп'ютері IBM-Q

Алгоритм повністю відповідає принципам гібридної архітектури, запропонованим у попередніх роботах [8, 10, 11], але адаптований під сучасні можливості Qiskit Aer (ідеальний та реальний із шумовим режимом).

Використовується гібридна класично-квантова архітектура реалізації генетичного алгоритму: ключові еволюційні оператори, такі як генерація початкової популяції та її еволюція в часі, повністю реалізовано з використанням квантового комп'ютера. Інші, допоміжні обчислення, такі як оцінка функції пристосованості та пошук найкращої особини, проводяться на класичному комп'ютері. При цьому один кубіт у суперпозиції квантових

станів з використанням квантової томографії визначає одну особину популяції, а квантовий реєстр реалізує всю квантову популяцію. Алгоритм буде апробовано на прикладі задач функціональної оптимізації, де квантова суперпозиція дозволяє ефективно досліджувати багатомірний простір пошуку (рис. 1).

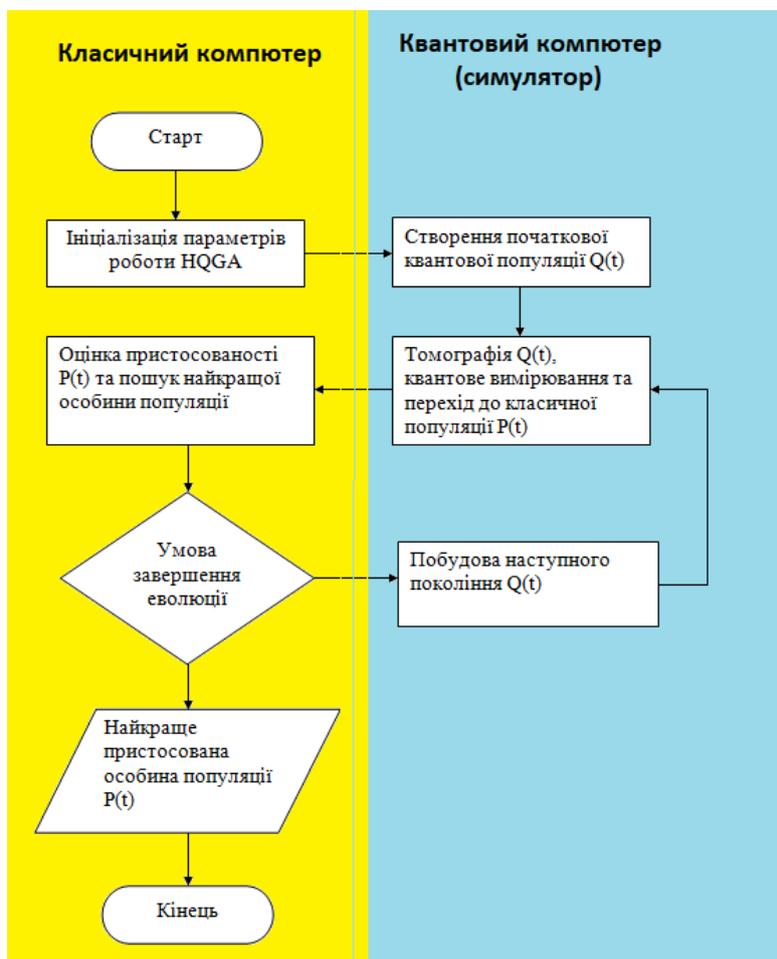


Рис. 1. Гібридний класично-квантовий генетичний алгоритм

Ключовими особливостями запропонованої архітектури є:

- одна особина = один кубіт (невеликий квантовий реєстр – квантова популяція);
- квантова популяція являє собою суперпозицією станів кубітів ($Q(t)$);
- відновлення квантової популяції здійснюється за допомогою квантової томографії;
- класична популяція $P(t)$ отримується в результаті квантового вимірювання;
- основні квантові еволюційні оператори:
 - мутація - природна через імовірнісний характер томографії та квантовий шум;
 - адаптивне керування кутами обертання (квантовий оператор R_y) на основі результатів томографії попереднього покоління.

Початкова квантова популяція $Q(0)$ генерується відповідно наступного квантового протоколу (рис. 2).

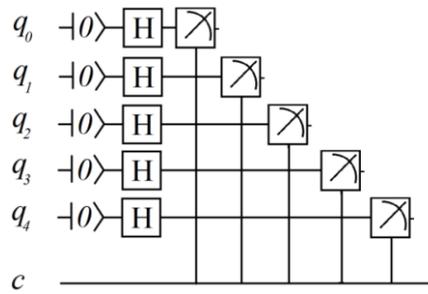


Рис. 2. Квантовий протокол початкової квантової популяції $Q(0)$

Томографія стану кубіта виконана відповідно до квантового протоколу (рис. 3).

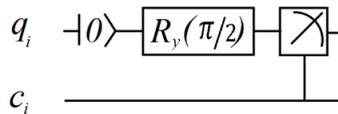
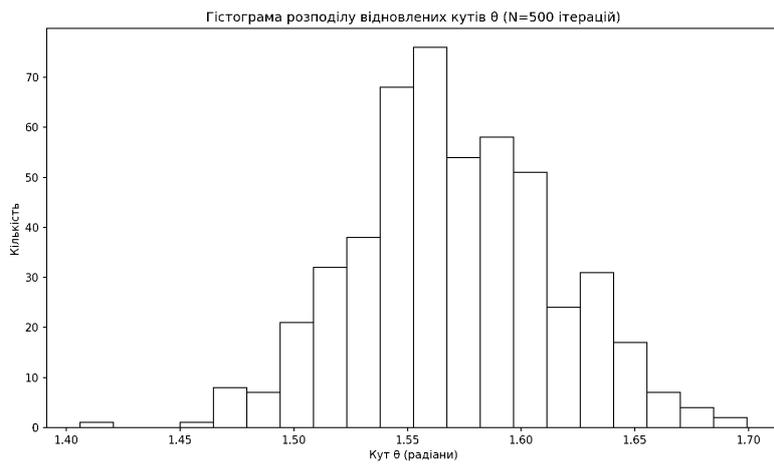
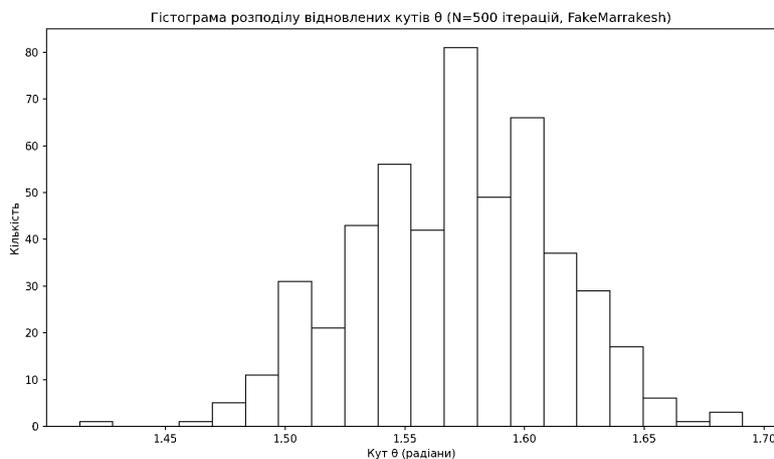


Рис. 3. Томографія стану кубіта

Точність відновлення стану визначається як типом симулятора, так і розміром квантового ансамблю (рис. 4 та табл. 2).



а)



б)

Рис. 4. Томографія стану кубіта при розмірі квантового ансамблю у 500 кубітів:
а – AerSimulator; б- FakeMarrakesh

Точність відновлення стану кубіта в залежності від розміру квантового ансамблю

Розмір квантового ансамблю	AerSimulator	FakeMarrakesh	FakeBrisben
50	1.566 ± 0.0494	1.563 ± 0.0472	1.575 ± 0.0471
100	1.572 ± 0.0485	1.570 ± 0.0464	1.568 ± 0.0466
200	1.570 ± 0.0453	1.570 ± 0.0453	1.568 ± 0.0448
500	1.571 ± 0.0424	1.571 ± 0.0453	1.570 ± 0.0449

Для організації еволюційного процесу відновлення стану популяції проведена згідно наступного протоколу (рис. 5).

$$q_i \rightarrow |0\rangle \rightarrow R_y(\theta_i)$$

Рис. 5. Протокол еволюційного процесу відновлення стану популяції

Кут θ_i в операторі квантового гейту $R_y(\theta_i)$ визначається результатами квантової томографії попереднього покоління та значенням кута θ_{opt} для найкращої особини популяції:

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_i + \Delta\theta, & \text{при } \theta_i < \theta_{opt}, \\ \theta_i - \Delta\theta, & \text{при } \theta_i > \theta_{opt}. \end{cases} \quad (2)$$

Величина приросту кута $\Delta\theta$ є параметром роботи алгоритму. Для визначення його оптимального значення було проведено додаткові дослідження на прикладі функції:

$$f(x) = \sin(x) + \sin\left(\frac{10}{3}x\right), x \in [-2.5, 7], \quad (3)$$

із глобальним максимумом $f(2.297) = 1.728$.

Динаміка еволюції найкращої особини квантової популяції розміром 5 кубітів представлено на рис. 6.

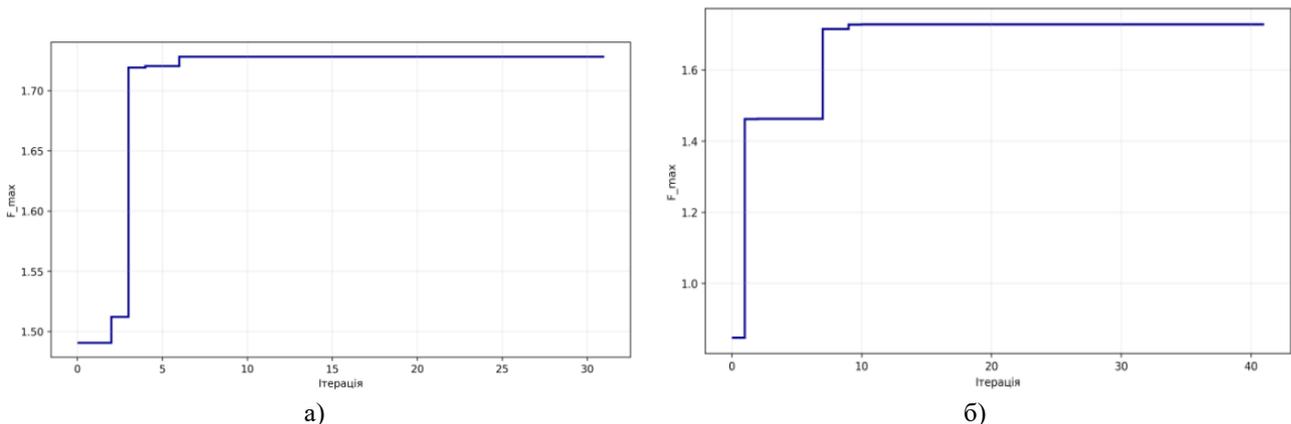


Рис. 6. Еволюція в часі найкращої особини квантової популяції: а – AerSimulator; б- FakeMarrakesh

Для ефективного глобального пошуку, як показали проведені числові експерименти, значення $\Delta\theta$ у випадку нескладних функцій повинно орієнтовно бути рівним $2 \cdot \Delta\theta_{avr}$ - отриманих в результаті квантової томографії середньоквадратичних відхилень. Аналіз результатів моделювань із різними типами симуляторів показує, що не залежно від згенерованої випадковим чином початкової популяції вона завжди, на протязі не більше 20

циклів еволюції, попадає в глобальний максимум. Остаточні уточнені значення для даних параметрів можна отримати при оптимізації функцій декількох змінних зі складнішою топологією.

Результати числового експерименту

Зважаючи на обмежені обчислювальні можливості (розмір квантової системи не може перевищувати 20 кубітів) для апробації пропонованого алгоритму було використано наступні тестові функції, розмірність яких не перевищує 4 [2]:

- Rastrigin Function:

$$F_1(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cdot \cos(2\pi x_i)], \quad x_i \in [-5.12, 5.12]$$

з глобальним мінімумом $F_1 = 0$ при $x = (0, \dots, 0)$.

- Ackley Function:

$$F_2(x) = -20e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + 22.718, \quad x_i \in [-5.0, 5.0]$$

з глобальним мінімумом $F_2 = 0$ при $x = (0, \dots, 0)$.

- Sphere Function:

$$F_3(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad x_i \in [0.0, 0.0]$$

з глобальним мінімумом $F_3 = 0$ при $x = (0, \dots, 0)$.

Функції є складними для традиційних градієнтних методів через велику кількість локальних мінімумів і плато. Тому вони підходять для перевірки ефективності гібридних квантово-генетичних алгоритмів. Числові експерименти проведено з використанням ідеального симулятора AerSimulator (метод statevector) та шумових бекендів (FakeMarrakesh, FakeManila), що дозволяють при моделюванні врахувати реальні квантові помилки та шум. Параметри експерименту були наступними: розмір популяції: 5 кубітів на один вимір; максимальна кількість поколінь - до 100; кількість спроб на один етап еволюції: 100–200.

Експеримент проведено на комп'ютері з процесором Intel Core i7, 32 ГБ ОЗУ та симулятором AerSimulator без GPU-прискорення. Результати моделювання приведені в табл. 3.

Таблиця 3

Експериментальні результати оптимізації тестових функцій

Функція	Симулятор	Середня кількість поколінь до збіжності	Середнє найкраще значення функції	Стійкість до початкових умов
Rastrigin Function	AerSimulator	18–32	0.004 ± 0.002	висока (з 30 запусків 28 досягли значення < 0.01)
	FakeMarrakesh	25–38	0.12 ± 0.08	розкид результатів, але зберігається збіжність у 85 % випадків
Ackley Function	AerSimulator	22–41	0.008 ± 0.004	висока (з 30 запусків 28 досягли значення < 0.01)
	FakeMarrakesh	26–51	0.35 ± 0.15	розкид результатів, але зберігається збіжність у 91 % випадків
Sphere Function	AerSimulator	12–25	0.001 ± 0.0005	Найшвидша збіжність серед усіх функцій завдяки гладкості поверхні
	FakeMarrakesh	28–35	0.09 ± 0.039	Найменший вплив квантового шуму

Як видно із приведених результатів для стійкості розв'язку бажано додати оператор квантової катастрофи [5]. Для зменшення залежності оптимального значення кута $\Delta\theta$ від вибраного стимулятора (чи квантового комп'ютера) краще застосувати його адаптивну поведінку в процесі еволюції. Імовірнісний характер вимірювання та шум реального комп'ютера чи шумового бекенду вводять стохастичність, одна вона не завжди приводить до покращення ефективності роботи алгоритму. Гібридний квантовий алгоритм демонструє в 3–5 разів швидшу збіжність у ідеальному режимі та зберігає прийнятну ефективність при квантовому шумі.

Порівняння ефективності роботи HQGA зі стандартним CGA (популяція 50 особин, бінарне кодування, мутація 0.01, кросовер 0.7) приведено в таб.4.

Таблиця 4

Ефективність роботи HQGA у порівнянні з класичним CGA

	Алгоритм	Середня кількість поколінь до збіжності
Rastrigin Function	CGA	85 - 150
	HQGA	18 - 32
Ackley Function	CGA	110 - 200
	HQGA	22 - 41
Sphere Function	CGA	60 - 120
	HQGA	12 - 25

Із приведених даних числового експерименту можна зробити наступні висновки:

- результати підтверджують перспективність гібридних класично-квантових підходів для задач функціональної оптимізації в умовах обмеженої кількості кубітів та наявності квантового шуму;

- HQGA показує високу швидкість збіжності до глобального екстремуму навіть при дуже малій популяції (5 кубітів), що є перевагою над класичними підходами;

- шумовий режим (шумові бекенди чи симулятори) дещо погіршує збіжність розв'язку, але сам алгоритм залишається стійким;

- в ідеальному режимі HQGA перевершує класичний GA в 3–5 разів за швидкістю збіжності завдяки квантовій суперпозиції та паралельному пошуку.

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- сучасні інструменти симуляції (Qiskit Aer, CUDA-Q) дозволяють ефективно моделювати квантові алгоритми (до 100+ кубітів у спеціальних випадках), але для повноцінного їх використання необхідне апаратне прискорення операцій на GPU та подальша оптимізація самих алгоритмів. Класична симуляція квантових алгоритмів не лише не втрачає актуальності, а навпаки – стає все більш потужним і необхідним компонентом квантових досліджень у перехідний період до реальних квантових комп'ютерів;

- класична симуляція квантових алгоритмів залишається критично важливим інструментом на сучасному, коли реальні квантові процесори обмежені кількістю кубітів (до 100–127 на 2025 рік), високим рівнем шуму та помилок. Фундаментальне обмеження – експоненційне зростання розмірності простору Гілберта $O(2^N)$ – робить повну симуляцію на основі вектора стану (statevector) практично неможливою для $N > 60$ –65 кубітів навіть на найпотужніших комп'ютерах;

- відсутність апаратного прискорення на GPU є суттєвим обмеженням поточної реалізації HQGA у Qiskit Aer.

Список літератури:

1. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Ann Arbor, MI : *University of Michigan Press*, 1975. 211 p.
2. Surjanovic S., Bingham D. *Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets*. Simon Fraser University, 2023. URL: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/optimization.html>.
3. A. Narayanan and M. Moore, "Quantum-inspired genetic algorithms," in *IEEE Int. Conf. Evol. Computation*, Nagoya, Japan. IEEE, 1996. doi: <https://doi.org/10.1109/icec.1996.542334>
4. G. Zhang, "Quantum-inspired evolutionary algorithms: a survey and empirical study," *J. Heuristics*, vol. 17, no. 3, pp. 303–351, Jun. 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/s10732-010-9136-0>.
5. H. Wang, J. Liu, J. Zhi, and C. Fu, "The Improvement of Quantum Genetic Algorithm and Its Application on Function Optimization," *Math. Problems Eng.*, vol. 2013, pp. 1–10, 2013. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/730749>.
6. IBM Quantum Experience Dashboard. URL: <https://quantum.ibm.com/>.
7. W. K. Wootters and W. H. Zurek, "A single quantum cannot be cloned," *Nature*, vol. 299, no. 5886, pp. 802–803, Oct. 1982. doi: <https://doi.org/10.1038/299802a0>
8. В. Ткачук, "Квантовий генетичний алгоритм та його реалізація на квантовому комп'ютері," *Model. Control Inf. Technol.*, no. 5, pp. 137–139, Nov. 2021. doi: <https://doi.org/10.31713/mcit.2021.45>
9. Yovchev D. "Simulations of quantum algorithms using the Qiskit Aer library and the matrix product state method on CPU and GPU," *Telecommunication inf. technol.*, vol. 88, no. 3, pp. 72–79, 2025. doi: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038707>
10. Ткачук В.М. *Можливості реалізації генетичного алгоритму на реальному квантовому комп'ютері // Кібернетичні моделювання та системи штучного інтелекту : матеріали конф. (КМОСС-2021)*. Черкаси : ЧДТУ, 2021. С. 74.
11. E. Ballinas and O. Montiel, "Hybrid Quantum Genetic Algorithm for the 0-1 Knapsack Problem in the IBM Qiskit Simulator," *Computación y Sist.*, vol. 26, no. 2, Jun. 2022. doi: <https://doi.org/10.13053/cys-26-2-4253>.

Надійшла до редакції 18.11.2025

Відомості про автора:

Ткачук Валерій Михайлович – кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyuk Carpathian National University, Україна; email: valerii.tkachuk@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7366-1676>

І. Я. САВКА, канд. фіз-мат. наук, М. С. ДУТЧАК, О. Т. КОВАЛЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЯКОСТІ ПЗ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ ВІД МЕТОДІВ ВИБОРУ ОЗНАК У МОДЕЛЯХ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Вступ

Стрімке зростання масштабів і складності кібератак, поява нових типів загроз та збільшення обсягів мережевого трафіку зумовлюють підвищені вимоги до систем виявлення вторгнень (Intrusion Detection Systems, IDS) [1]. Такі системи мають не лише забезпечувати високий рівень виявлення атак, а й гарантувати прийнятну швидкодію, стабільність роботи та здатність до масштабування в умовах реальних мережевих навантажень. Суттєву роль у розвитку IDS відіграють методи машинного навчання (ML), які дозволяють створювати аномальні та гібридні системи виявлення загроз. Водночас на практиці ML-базовані IDS часто стикаються з проблемами високої кількості хибних спрацювань, значних обчислювальних витрат та чутливості до якості вихідних даних. Одним із ключових чинників, що визначає ефективність таких систем для аналізу мережевого трафіку, є відбір інформативних ознак (Feature Selection, FS) із множини наявних характеристик. Саме відбір ознак впливає на точність класифікації, час навчання та прогнозування, необхідний обсяг ресурсів і можливості масштабування IDS. Більшість існуючих досліджень, присвячених застосуванню FS у задачах виявлення вторгнень, зосереджуються переважно на покращенні окремих класифікаційних метрик (accuracy, precision, F1, recall тощо). При цьому якість програмного забезпечення IDS як цілісного продукту, у розумінні стандарту якості, наприклад ISO/IEC 25010, розглядається недостатньо. Недостатньо формалізованими залишаються питання того, як різні підходи до відбору ознак впливають на баланс між функціональними та нефункціональними характеристиками IDS систем, а також, яким чином враховувати разові витрати на виконання процедури FS у загальній оцінці якості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування технік відбору ознак у ML-базованих IDS є важливим кроком, що покращує ефективність, точність та інтерпретованість моделі шляхом зменшення розмірності та усунення зайвих атрибутів даних [5, 6]. У табл. 1 наведена порівняльна характеристика основних методів вибору ознак: фільтраційні (Filter), обгорткові (Wrapper) та вбудовані (Embedded) [3]. Крім того, у деяких дослідженнях використовується комбінований підхід, що часто дає кращий результат, ніж кожен окремо.

Таблиця 1

Підхід (Feature Selection)	Опис та характеристики	Приклади методів
Filter (фільтраційний)	Відбір ознак на основі статистичних критеріїв, незалежно від моделі класифікації. Швидкий і не призводить до перенавчання під конкретний алгоритм, але може не врахувати спільний ефект ознак.	Information Gain, χ^2 -тест, коеф. кореляції, ReliefF, відбір на основі варіації.
Wrapper (обгортковий)	Пошук оптимальної підмножини ознак шляхом багаторазового навчання і оцінки моделі. Забезпечує високі результати для обраної моделі, але дуже затратний за часом і обчисленнями.	Recursive Feature Elimination (RFE), покроковий пошук вперед/назад, генетичні алгоритми, метод рою часток (PSO).
Embedded (вбудований)	Відбір ознак під час навчання моделі. Модель сама визначає важливість ознак і може відкинути неважливі. Ефективніший за wrapper щодо ресурсів, враховує взаємодію з моделлю.	Дерева рішень, Random Forest (Gini importance), L1-регуляризована логістична регресія (LASSO).

За даними експериментів [2, 4, 7], модель, навчена на найбільш релевантних ознаках, досягає майже такої ж точності детекції, як і модель на повному наборі ознак. При цьому, обсяг даних скорочується, а час обробки суттєво зменшується. В окремих випадках відбір ознак навіть може підвищити точність виявлення, оскільки модель не враховує шумові фактори. Практичні експерименти підтверджують, що різні методи FS впливають на якість IDS по-різному. Наприклад, дослідження впливу фільтраційних методів на продуктивність чотирьох класифікаторів (MLP, SVM, XGBoost, Random Forest) показало, що за умови правильного вибору підмножини ознак можна значно зменшити їх кількість без погіршення якості детекції атак [6]. У роботі [8] запропоновано гібридну багатоетапну схему FS, що дозволило зменшити кількість ознак з 42 до 23 та підвищити точність класифікації аномалій з 82.25% до 84.24%. З іншого боку, невдале вилучення ключових ознак може погіршити ефективність IDS. Наприклад, якщо відкинути параметр, який критично відрізняє певну атаку від нормального трафіку, класифікатор може почати плутати цю атаку з легітимною активністю. Тому процес відбору ознак має проводитися обережно, з оцінкою впливу кожної вилученої ознаки на результат. Для цього зазвичай будують графіки залежності метрик моделі від кількості ознак або порогу значущості та вибирають компромісний набір.

Формулювання цілей статті

Попри значну кількість досліджень, присвячених методам відбору ознак, все ще недостатньо вивченими залишаються питання комплексного впливу різних підходів до відбору ознак не тільки на точність виявлення атак, але й на інші критично важливі характеристики якості IDS. Крім того, у науковій літературі фактично відсутні підходи до формалізації узагальненого показника якості IDS, який би інтегрував функціональні та нефункціональні характеристики системи та дозволяв об'єктивно порівнювати різні методи відбору ознак у єдиному числовому вимірі. Бракує також і методики, яка враховувала б ресурсні витрати, пов'язані зі застосуванням відбору ознак, зокрема час навчання, швидкість прогнозування та масштабованість моделі при роботі з великими масивами даних.

З огляду на зазначені проблеми, у межах даного дослідження ставиться завдання експериментального дослідження залежності якості ПЗ від методів вибору ознак у моделях ML, а також розроблення методики комплексної оцінки якості IDS з урахуванням впливу різних підходів до відбору ознак та побудови інтегрального показника якості.

Методологія та основний матеріал досліджень

Для оцінки якості ПЗ доцільно керуватися міжнародним стандартом ISO/IEC 25010 [10], що визначає модель якості ПЗ та описує сукупність характеристик, серед яких для IDS особливо важливими є наступні ключові групи.

Функціональна придатність (Functional Suitability) – здатність ПЗ коректно виконувати потрібні функції та досягати поставлених цілей. У даному дослідженні функціональна придатність

$$F_{func} = \frac{Accuracy + F1}{2}$$

представлена через метрики *Accuracy* (загальна частка правильних спрацювань) та *F1-score* (гармонійне середнє влучності та повноти), що разом відображають здатність IDS правильно класифікувати трафік.

Надійність (Reliability) – здатність системи підтримувати необхідний рівень виконання функцій відповідно до заданих умов протягом певного часу. Для IDS критерієм надійності роботи можна вважати стійкість до хибних спрацювань та помилок. Для вимірювання показника надійності $F_{rel} = Precision$ використано влучність *Precision* (точність позитивного прогнозу), що характеризує частку дійсних атак серед усіх спрацювань системи.

Продуктивність (Performance Efficiency) – характеристика, що відображає швидкодію та оптимальність використання ресурсів ПЗ. Продуктивність пропонується визначати як

зважене середнє між ефективністю процесу навчання F_{train} та ефективністю прогнозування F_{infer} :

$$F_{perf} = \alpha * F_{train} + (1 - \alpha) * F_{infer},$$

де коефіцієнт $\alpha \in [0, 1]$ дозволяє задати пріоритетність. Для оцінювання метрики F_{train} використовується формула:

$$F_{train} = \exp\left(-\beta * \frac{T_{eff}}{T_{train}^{base}}\right),$$

де $\beta > 0$ – коефіцієнт згладжування, що керує чутливістю метрики до часу навчання, а T_{train}^{base} – час навчання тієї ж моделі без відбору ознак (на повному наборі ознак). Тут величина T_{eff} є ефективним часом навчання з урахуванням процедури відбору ознак FS і визначається як $T_{eff} = T_{train} + \frac{T_{FS}}{K}$, де T_{train} – фактично виміряний час навчання моделі з використанням певного методу FS, T_{FS} – час, витрачений на виконання процедури FS, K – кількість планових перенавчань моделі протягом певного періоду її використання.

Показник ефективності прогнозування $F_{infer} = 1 - \frac{T_{predict}}{T_{max}}$ характеризує ефективність часу роботи моделі під час класифікації мережевого з'єднання чи пакету. Для його обчислення порівнюється швидкодія моделей відносно найповільнішої з них. Тут $T_{predict}$ – час прогнозування конкретним алгоритмом, а T_{max} – максимальний час прогнозування серед усіх порівнюваних випадків. F_{infer} показує, наскільки даний алгоритм швидший за найповільніший еталон. Для швидших моделей значення показника наближається до 1, що відображає їх відносний вигравш у швидкодії.

Масштабованість (Scalability) – у стандарті ця характеристика прямо не виділена, але у контексті оцінки IDS ми вводимо її як важливий показник якості такого ПЗ. Масштабованість описує здатність системи ефективно працювати зі збільшенням обсягу даних чи навантаження. Показник масштабованості F_{scale} характеризує здатність IDS-моделі ефективно працювати зі зростаючими обсягами даних і кількістю ознак. Зменшення розмірності, як правило, спрощує розгортання, перенесення та паралельну обробку моделі. Кількісну оцінку цього ефекту задаємо формулою:

$$F_{scale} = \max\left\{0, 1 - \frac{N}{N_{base}}\right\},$$

де N – кількість ознак після застосування певного FS-методу, а N_{base} – кількість ознак у початковому датасеті (noFS). За відсутності скорочення кількості ознак показник масштабованості набуває нульового значення, а у разі зменшення розмірності F_{scale} відображає відносну частку усунених ознак.

Об'єднавши описані складові, загальну оцінку якості IDS-моделі визначаємо через інтегральний показник формулою:

$$Q = w_1 * F_{func} + w_2 * F_{rel} + w_3 * F_{perf} + w_4 * F_{scale},$$

де w_1, w_2, w_3, w_4 – ваги, що відображають пріоритетність відповідних характеристик. У межах даного дослідження для визначення ваг використовується метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНП). Побудова ваг здійснюється на основі попарних порівнянь критеріїв, які виконуються експертом із використанням вербально-числової шкали Сааті. Зазначена шкала дає змогу формалізувати суб'єктивні експертні судження шляхом їх відображення у числові оцінки інтенсивності переваги одного критерію над іншим.

На основі цього був розроблений модульний веб-застосунок на базі Streamlit із багаторівневою архітектурою, що розділяє ядро для обробки даних і алгоритмів IDS та веб-

інтерфейс для взаємодії з користувачем, з підтримкою повного циклу експериментів і швидкого перерахунку показників якості (див. рис. 1-5).

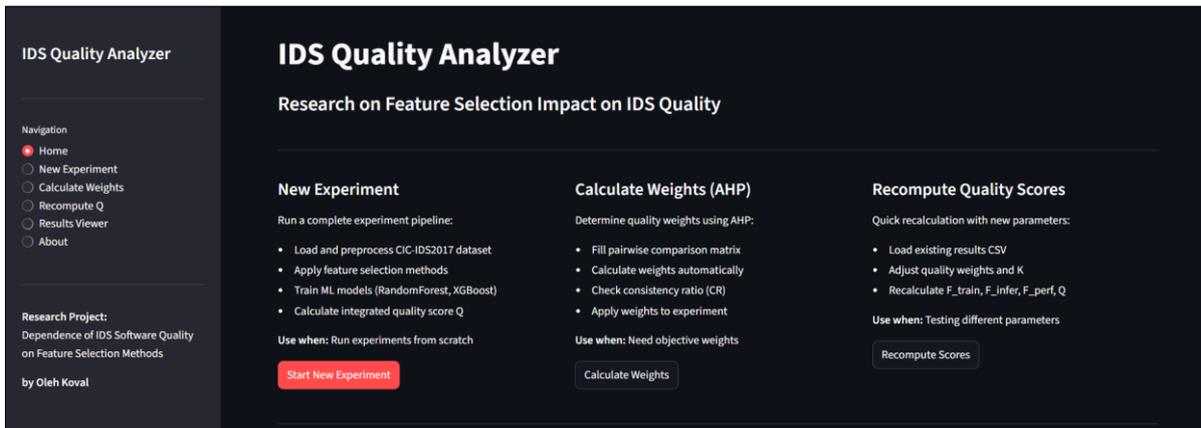


Рис. 1. Головна сторінка веб-застосунку

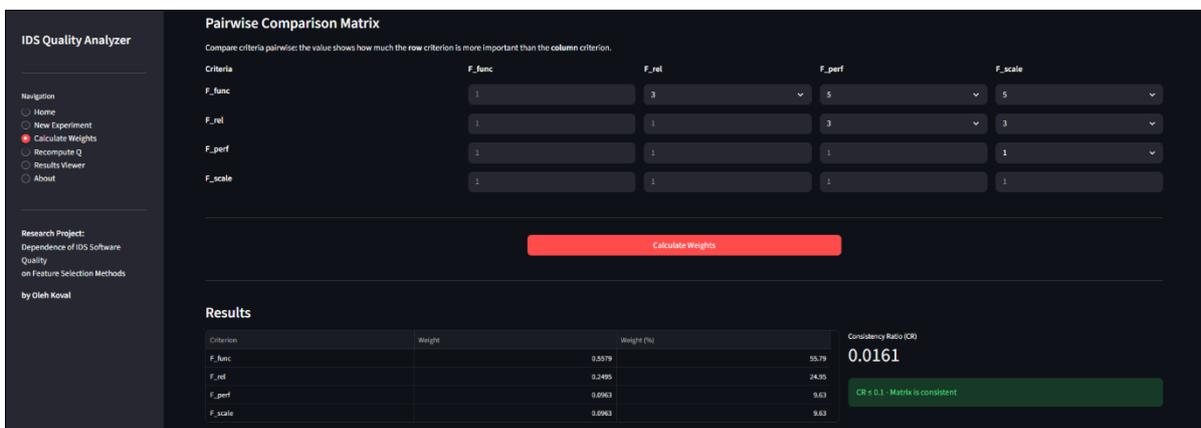


Рис. 2. Приклад обрахунку ваг за методом АНР

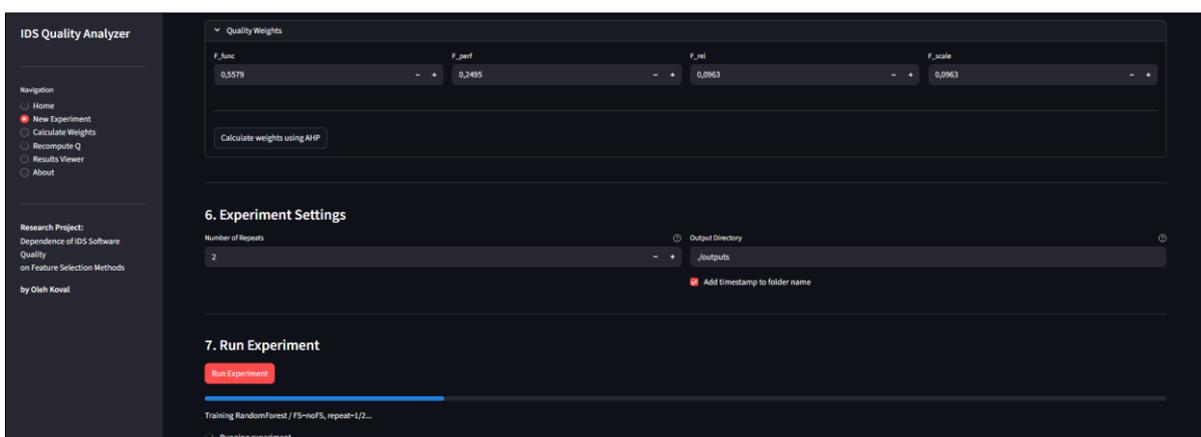


Рис. 3. Процес проведення експерименту

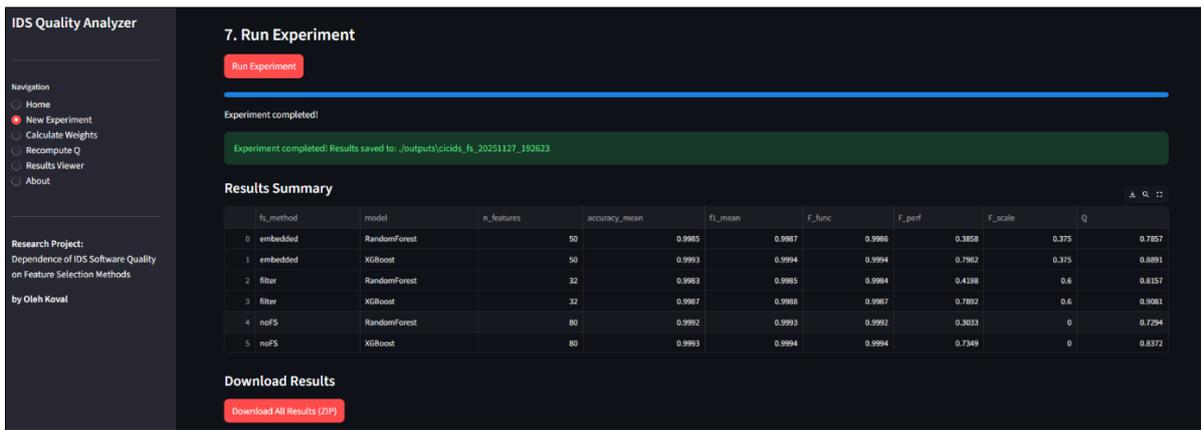


Рис. 4. Успішне завершення проведення експерименту



Рис. 5. Візуалізація показників після перерахунку

Результати експерименту та їх інтерпретація

У дослідженні використано відкритий набір даних CIC-IDS2017 [9], що містить детальні записи мережевого трафіку, мітки атак та нормальної діяльності, а також охоплює широкий спектр різновидів атак (DoS, DDoS, Web-Attacks, Infiltration, Botnet, Brute-force тощо). Перевагою CIC-IDS2017 є те, що він має реалістичний трафік за декілька днів, кожен з яких присвячений певним атакам. Всього набір містить ~3 млн мережевих сесій з 80 різними ознаками.

Для досягнення цілей даного дослідження дані було підготовлено як задачу бінарної класифікації: кожен запис позначено як «нормальний» або «атака» (всі типи атак об'єднані в один «шкідливий» клас). Оригінальні CSV-файли датасету було об'єднано та випадковим чином розбито на навчальну і тестову вибірки у співвідношенні 70/30. Перед навчанням моделей здійснено базове попереднє оброблення даних: очищено або видалено записи з відсутніми значеннями полів (деякі сесії мали некоректні значення через помилки збору даних), категоріальні атрибути (тип протоколу, служби тощо) перетворено на числові через one-hot кодування або зіставлення категорій з числами. Також було виконано нормалізацію числових ознак (методом мін-макс до інтервалу [0;1]) задля прискорення сходження алгоритмів навчання і щоб жодна ознака не домінувала за масштабом.

Було розглянуто три популярних підходи до FS (див. табл. 1), які відрізняються за способом відбору ознак, а також контрольний випадок без відбору (noFS). Для побудови IDS-моделі використано два алгоритми машинного навчання: Random Forest (RF) і XGBoost (XGB) з базовими параметрами. Для кожного з чотирьох сценаріїв відбору ознак (noFS, Filter, Embedded, Wrapper) і двох моделей (Random Forest, XGBoost) було виконано повний

цикл: відбір ознак (для трьох методів FS), навчання моделі на навчальній вибірці, тестування на тестовій, вимірювання часу навчання та прогнозування, а також обчислення метричних показників Accuracy, Precision, Recall, F1. Щоб зменшити випадкові флуктуації часу (відхилення від середнього), кожен експеримент повторювався двічі, а середні значення часу навчання і прогнозування визначалися за результатами усереднення повторів. Вимірювання часу виконувалося за допомогою функції `time.perf_counter()` у Python. Метрики точності обчислювалися засобами пакета `sklearn.metrics`.

У наведених табл. 2 і табл. 3 представлені основні результати дослідження із використанням таких параметрів $\alpha = \beta = 0.5, K = 36, w_1 = 0.55, w_2 = 0.25, w_3 = w_4 = 0.1$.

Таблиця 2

	Метод	Модель	N	T_{train}	T_{FS}	T_{eff}	F_{train}	$T_{predict}$	F_{infer}
1	embedded	RF	52	56.30	161	60.79	0.60	0.67	0.009
2	embedded	XGBoost	52	5.20	161	9.68	0.55	0.23	0.66
3	filter	RF	32	28.97	80	31.19	0.77	0.49	0.28
4	filter	XGBoost	32	4.68	80	6.89	0.65	0.18	0.73
5	wrapper	RF	20	24.42	1590	68.60	0.56	0.43	0.37
6	wrapper	XGBoost	20	3.03	1590	47.20	0.05	0.17	0.74
7	noFS	RF	80	59.50	0	59.50	0.61	0.68	0.0
8	noFS	XGBoost	80	8.06	0	8.06	0.61	0.20	0.7

Таблиця 3

	Метод	Модель	N	F_{func}	F_{rel}	F_{perf}	F_{scale}	Q
1	embedded	RF	52	0.99	0.99	0.30	0.35	0.763
2	embedded	XGBoost	52	0.99	0.99	0.60	0.35	0.839
3	filter	RF	32	0.99	0.99	0.52	0.60	0.842
4	filter	XGBoost	32	0.99	0.99	0.69	0.60	0.885
5	wrapper	RF	20	0.99	0.99	0.46	0.75	0.842
6	wrapper	XGBoost	20	0.99	1.0	0.40	0.75	0.825
7	noFS	RF	80	0.99	0.99	0.30	0.0	0.729
8	noFS	XGBoost	80	0.99	0.99	0.65	0.0	0.817

В усіх проведених експериментах використання методів відбору ознак FS не погіршило здатність моделей виявляти атаки. Алгоритми FS здатні вилучити до 75% ознак (як у випадку wrapper, 20 із 80) без втрати інформації, необхідної для правильної класифікації. З точки зору IDS, це означає, що можна значно спростити моделі та вхідні дані, зберігши той самий рівень детекції атак. Такий висновок узгоджується з результатами робіт [7, 8], де також відзначалося, що видалення нерелевантних ознак часто не знижує, а інколи навіть підвищує точність моделі за рахунок усунення шуму та колінеарності.

Найбільші відмінності між підходами проявилися саме в нефункціональних аспектах. Без застосування FS (noFS) система демонструє найгірші показники як за швидкодією, так і за масштабованістю. Це цілком очікувано, адже моделі з 80 ознаками мають більший обсяг обчислень. Застосування будь-якого з методів FS істотно підвищує продуктивність F_{perf} . Найбільший приріст продуктивності забезпечив фільтраційний метод (див. табл. 3). Це пояснюється оптимальним співвідношенням, а саме помірний час виконання FS (80 с.) та суттєве зменшення кількості ознак, і як наслідок – помітне прискорення як навчання, так і прогнозування. Embedded дав менший вигравш через відносно невелике скорочення ознак і значний час FS, а wrapper – через надто великий час на FS, який зменшив вигравш від скорочення ознак у термінах ефективного часу.

Щодо масштабованості F_{scale} з точки зору можливості розгортання IDS на великі дані, то тут лідером став wrapper, оскільки модель з 20 ознаками може обробляти значно більші потоки трафіку без перевантаження, ніж модель з 80 ознаками. Фільтраційний підхід та

embedded теж значно підвищили масштабованість моделі (на 60% і 35% відповідно). Проте на практиці, wrapper-відбір ознак доцільний лише якщо система має ресурси виконати цей відбір офлайн, інакше тривале очікування може нівелювати користь.

Проаналізувавши показники надійності, продуктивності та масштабованості, було обчислено значення інтегрального показника Q для різних підходів (рис. 6). Найкращим підходом виявився фільтраційний FS із XGBoost, $Q = 0.885$. Це може слугувати рекомендацією: спочатку відсіяти явно зайві параметри швидким статистичним методом, а потім застосувати потужний алгоритм класифікації. Така комбінація забезпечить високу якість виявлення при оптимальній продуктивності та масштабованості.

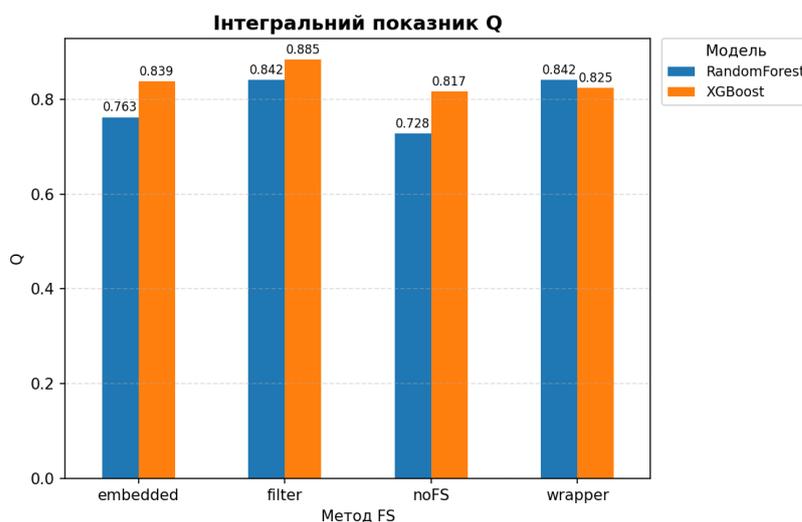


Рис. 6. Значення інтегрального показника Q

Висновки

У роботі виконано дослідження проблеми оцінювання якості програмного забезпечення систем виявлення вторгнень (IDS), побудованих на основі методів машинного навчання та різних підходів до відбору ознак Feature Selection. На основі аналізу було розроблено методіку комплексної оцінки якості систем із урахуванням впливу методів відбору ознак, що об'єднує функціональні й нефункціональні характеристики системи відповідно до моделі ISO/IEC 25010. Обґрунтовано вибір основних показників якості систем для виявлення вторгнень: функціональної придатності, надійності, продуктивності та масштабованості. Для кожного з них запропоновано формули кількісної оцінки, на основі яких формується інтегральний показник якості.

Результати демонструють, що вибір методу FS та зменшення простору ознак суттєво впливають на продуктивність і масштабованість IDS, що обґрунтовує включення цього фактору до комплексної оцінки якості сучасних систем виявлення вторгнень.

Практичним результатом дослідження є розроблений програмний засіб для кількісного оцінювання якості систем для виявлення вторгнень, який автоматизує повний цикл експериментів з порівнянням різних методів відбору ознак та ML-моделей на основі відкритих датасетів мережевого трафіку, з подальшим обчисленням інтегрального показника якості та побудовою візуалізацій результатів.

Список літератури:

1. A. Khraisat, I. Gondal, P. Vamplew, and J. Kamruzzaman, "Survey of intrusion detection systems: techniques, datasets and challenges," *Cybersecurity*, vol. 2, no. 1, Jul. 2019. doi: <https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7>.
2. S. Maza and M. Touahria, "Feature Selection Algorithms in Intrusion Detection System: A Survey," *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 12, no. 10, Oct. 2018. doi: <https://doi.org/10.3837/tiis.2018.10.024>.

3. N. Pudjihartono, T. Fadason, A. W. Kempa-Liehr, and J. M. O'Sullivan, "A Review of Feature Selection Methods for Machine Learning-Based Disease Risk Prediction," *Frontiers in Bioinformatics*, vol. 2, Jun. 2022. doi: <https://doi.org/10.3389/fbinf.2022.927312>.
4. H. Abubaker, F. Muchtar, A. R. Khairuddin, A. N. A. Nuar, Z. M. Yunus, and C. Salimun, "Exploring Important Factors in Predicting Heart Disease Based on Ensemble- Extra Feature Selection Approach," *Baghdad Science Journal*, vol. 21, no. 2(SI), p. 0812, Feb. 2024. doi: <https://doi.org/10.21123/bsj.2024.9711>.
5. S. M. Kasongo and Y. Sun, "Performance Analysis of Intrusion Detection Systems Using a Feature Selection Method on the UNSW-NB15 Dataset," *Journal of Big Data*, vol. 7, no. 1, Nov. 2020. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00379-6>.
6. H. Zouhri, A. Idri, and A. Ratnani, "Evaluating the impact of filter-based feature selection in intrusion detection systems," *International Journal of Information Security*, vol. 23, pp. 759–785. Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s10207-023-00767-y>.
7. B. Reis, E. Maia, and I. Praça, "Selection and Performance Analysis of CICIDS2017 Features Importance," in *Foundations and Practice of Security*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020, pp. 56–71. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45371-8_4.
8. Y. Yin *et al.*, "IGRF-RFE: a hybrid feature selection method for MLP-based network intrusion detection on UNSW-NB15 dataset," *Journal of Big Data*, vol. 10, no. 1, Feb. 2023. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00694-8>.
9. Canadian Institute for Cybersecurity, *Intrusion Detection Evaluation Dataset (CICIDS2017)*, University of New Brunswick, 2018. [Online]. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/ids-2017.html> (accessed: Sep. 25, 2025).
10. ДСТУ ISO/IEC 25010:2016. *Інженерія систем і програмних засобів. Вимоги до якості систем і програмних засобів та її оцінювання (SQuaRE). Моделі якості системи та програмних засобів*, 2016.

Надійшла до редколегії 14.11.2025

Відомості про авторів:

Савка Іван Ярославович – кандидат фіз.-мат. наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: ivan.savka@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3442-5547>

Дутчак Марія Степанівна – викладач кафедри інформаційних технологій Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: mariia.dutchak@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3337-5613>

Коваль Олег Тарасович – магістрант кафедри інформаційних технологій, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: oleh.koval.20@pnu.edu.ua

ГЕНЕРАТИВНІ КОНКУРЕНТНІ МЕРЕЖІ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ГРАФІЧНОГО КОНТЕНТУ ТА ЗАФАРБОВУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Вступ

Зафарбовування зображень (image inpainting) – це техніка комп'ютерного зору, яка дозволяє відновлювати та реконструювати відсутні або пошкоджені ділянки зображень на основі контексту навколишніх пікселів. Вона є важливою у дослідженнях комп'ютерного зору, фотографії та цифрових медіа, і завдяки розвитку методів глибокого навчання значно підвищилася якість та практична застосовність цих рішень.

Процес зафарбовування (inpainting) передбачає використання маски, яка визначає області, що потребують відновлення. Зазвичай маска формується на основі чорно-білого перетворення оригінального зображення: білі пікселі позначають ділянки для заповнення, чорні – ті, які залишаються незмінними. Пікселі, виділені маскою, відновлюються за допомогою алгоритму генерації [1].

Існуючі підходи до видалення небажаних об'єктів у зображеннях поділяють на два основні класи: методи зафарбовування та методи копіювання-переміщення. Останні передбачають заповнення ділянки, що видаляють, частиною іншого зображення або іншої області того ж зображення, але вони обмежені простими сценами та не ефективні для обличчя або складних композицій. Традиційні методи зафарбовування використовувалися для реставрації пошкоджених старих зображень або усунення дрібних дефектів, таких як подряпини, шум, текст чи артефакти [2].

Сучасні генеративні методи inpainting, включно з GAN та авторегресивними моделями, дозволяють відновлювати як текстурні, так і структурні елементи зображень. Вони здатні видаляти об'єкти будь-якої форми та розміру без помітних слідів, що особливо важливо для обробки складних та великих ділянок зображень. Подальші дослідження зосереджені на підвищенні ефективності відновлення в реальному часі та на адаптації алгоритмів до різних форм масок, включаючи екстремальні випадки, де більша частина зображення відсутня.

Актуальність досліджень у сфері зафарбовування зображень зумовлена зростаючою потребою у відновленні та редагуванні цифрового контенту в умовах поширення великих обсягів зображень у соціальних мережах, медіа та архівах. Надійні методи inpainting дозволяють не лише усувати дефекти та видаляти небажані об'єкти, але й автоматично відновлювати відсутні частини складних сцен, зберігаючи їхню текстурну та структурну цілісність. Сучасні підходи включають класичні алгоритми на основі інтерполяції та копіювання-переміщення, а також методи глибокого навчання, зокрема генеративні конкурентні мережі (GAN), автокодери та трансформери, які демонструють високу здатність до відновлення великих і складних ділянок зображень. Особливо популярними є GAN-базовані моделі, що поєднують генеративну здатність із використанням контекстуальних масок, забезпечуючи реалістичне та безшовне заповнення відсутніх областей. Розробка таких алгоритмів є ключовою для підвищення ефективності автоматизованих систем редагування та обробки графічного контенту в різних галузях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток напрямку безшовного видалення об'єктів із зображень передбачає впровадження нових архітектур нейронних мереж, оптимізацію функцій втрат, застосування

нормалізаційних потоків та методів трансформерів для підвищення точності, швидкості та ефективності алгоритмів. Сучасні дослідження демонструють значний прогрес у розвитку генеративних моделей, що підтверджує перспективність подальшого вдосконалення методів image inpainting для досягнення високоякісного та реалістичного відновлення контенту.

У статті [3] запропоновано метод імпейнтингу, який дозволяє видаляти об'єкти на основі текстових інструкцій, забезпечуючи гнучке керування результатом. Дослідження [4] демонструє каскадну модифікацію GAN, що враховує структуру об'єктів на зображенні, підвищуючи точність відновлення складних сцен. В роботі [5] описано підхід для безшовного видалення об'єктів разом із їхніми візуальними ефектами, що дозволяє уникнути помітних артефактів у відновлених ділянках.

Попри значні досягнення, існуючі методи мають певні обмеження. У складних сценах або при видаленні великої кількості об'єктів одночасно можуть виникати спотворення або артефакти. Крім того, застосування великих моделей та обширних наборів даних робить процес навчання та інференсу ресурсомістким і тривалим [6–7]. Ці проблеми визначають актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення продуктивності, зменшення обчислювальної складності та забезпечення стабільної якості відновлення навіть у складних умовах.

Постановка задачі дослідження

Штучний інтелект сприяв появі численних додатків для видалення об'єктів із зображень, проте більшість із них мають обмеження щодо точності, швидкості або зручності використання. Метою дослідження є розробка системи безшовного видалення об'єктів на будь-яких зображеннях з використанням Python та інтеграцією вдосконаленої функції втрат для підвищення ефективності порівняно з існуючими аналогами.

Дослідження спрямоване на застосування методів генеративних конкурентних мереж (GAN) для задач зафарбовування зображень та оцінки їх реалізації у програмному забезпеченні з використанням удосконалених алгоритмів генерації зображень.

Система має задовольняти наступні вимоги: висока точність відновлення зображень; збереження текстурних та кольорових особливостей; мінімальний час відповіді; відкритість, гнучкість та можливість інтеграції у сторонні рішення.

Розробка удосконаленого методу для генерації зображень з унікальною функцією втрат

Для реалізації системи інтелектуального видалення об'єктів із зображень на основі генеративних конкурентних мереж із кастомною функцією втрат необхідно виконати кілька ключових етапів. Спершу визначаються джерела даних, після чого оцінюється їх якість, характеристики та придатність для навчання моделі. Наступним кроком є обґрунтування вибору методів машинного навчання.

Етапи розробки містять: аналіз доступних датасетів, оцінка обраного датасету Places та опис реалізації методу на основі GAN [8, 9].

GAN-мережа побудована на двох ключових компонентах: генераторі та дискримінаторі. В основі запропонованої системи лежать спеціалізовані алгоритми для забезпечення високоякісного відновлення зображень. Генератор складається з двох підмереж:

- SINet (Semantic Inferring Network) – виділяє семантичні ознаки з вхідного зображення з урахуванням замаскованих областей за допомогою послідовних згорткових шарів.

- GPNet (Global Perceiving Network) – захоплює глобальний контекст, обробляючи як видимі, так і приховані ділянки; використовує розширені згортки для збереження просторової інформації [10].

Після обробки вхідних даних у мережах SINet та GPNet, їхні вихідні значення об'єднуються: оригінальне зображення з маскою інтегрується з відновленим результатом SINet, формуючи повне представлення зображення. Це об'єднане представлення передається до GPNet для подальшого вдосконалення [11]. Такий підхід підвищує якість синтезованих

даних і ускладнює завдання дискримінатора, який повинен ефективно розпізнавати складні патерни та визначати походження зображення [8].

Модель приймає на вхід два об'єкти: бінарну маску, що позначає регіони для відновлення, та саме зображення (реальне або синтезоване). Основна частина дискримінатора складається з шести послідовних конволюційних шарів, які поступово виділяють ознаки з вхідних даних. Останній конволюційний шар застосовує активацію Leaky ReLU, що вводить нелінійність і дозволяє моделювати складні залежності, уникаючи проблеми «вимираючого ReLU». На відміну від стандартного ReLU, Leaky ReLU дозволяє невеликому негативному градієнту проходити через шар, що покращує стабільність навчання [12-13].

Вихід дискримінатора формує вектор ознак, який агрегує характеристики зображення та може бути використаний для оцінки якості згенерованого контенту.

У дослідженні представлено новий підхід до генеративної мережі та спеціалізовану функцію втрат для задач GAN із зафарбовування зображень. Запропоноване рішення усуває проблему недостатньої деталізації, характерну для попередніх методів. Завдяки оптимізованій архітектурі система демонструє покращені результати порівняно з існуючими підходами.

Для GAN моделі розроблено наступні формули, які контролюють навчання генератора та дискримінатора:

$$L_{gen} = -E_x [D(G(x))] + \lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1, \quad (1)$$

$$L_{gen} = E_x [L_{real}(G(x))] + E_z [L_{fake}(G(D(x)))] + \lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1, \quad (2)$$

де L_{gen} – функція помилки генератора; L_{real} – функція втрат для реальних зображень; E_x – це очікування, що зображення є реальних; $D(G(x))$ – вихід дискримінатора D , який приймає згенероване зображення $G(x)$ як вхід; E_z – очікування за латентними змінними z ; $\lambda_1 L_2, \lambda_2 L_1$ – регуляризаційні члени із коефіцієнтами [14].

Завдяки системі інтелектуального видалення, розробленої у межах даного дослідження, користувачі мають змогу модифікувати різні фотографії із мінімальними артефактами, адаптовуючи їх до власних потреб.

Функції втрат оцінюють наскільки компоненти нейронної мережі виконують свої завдання: генератор має відтворювати реалістичні зображення, а дискримінатор – відрізнити справжні від згенерованих. Сигмоїдальна функція на виході дискримінатора перетворює його значення на ймовірність того, що зображення є реальним, що впливає на величину втрат: чим точніша модель, тим менші втрати. Під час навчання ваги й параметри мережі оптимізуються на основі значень функції втрат, що дозволяє алгоритму поступово покращувати точність відновлення.

$$generator_loss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N fake_output_i + \lambda_1 L_{2_loss} + \lambda_2 L_{1_loss} \quad (3)$$

$$discriminator_loss = real_loss + fake_loss + \lambda_1 L_{2_loss} + \lambda_2 L_{1_loss}, \quad (4)$$

де втрата для реальних зображень

$$real_loss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(\sigma(real_output_i)),$$

та втрата для згенерованих зображень [15]

$$fake_loss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log(1 - \sigma(real_output_i))$$

У ході експериментів було протестовано різні функції втрат. Більшість стандартних варіантів або ускладнювали обчислення, або не покращували результати. Запропонована система поєднує декілька типів втрат із можливістю налаштування ваг для кожної з них, що дозволяє генератору створювати більш реалістичні зображення. Зокрема, комбінування адверсарної втрати з L1 та L2 втратами забезпечує високу якість відновлення, зменшуючи розбіжність між оригінальними та відновленими ділянками [15].

Після реалізації системи проведено серію експериментів з метою оцінки її роботи. Тестування проводилося через аналіз візуальних параметрів, що базується на суб'єктивному візуальному сприйнятті. На рис. 1 подано приклад роботи GAN механізму.



Рис. 1. Приклад результату роботи системи: а) початкове зображення, б) видалення дерева з правої частини зображення

Результати показали значне покращення якості відновлення зображень: середнє значення функції втрат генератора знизилось на 65% порівняно з базовою моделлю, а при порівнянні з циклічною втратою спостерігалось покращення 2–3%. При цьому час обчислень залишився стабільним, зростання середнього часу однієї ітерації не перевищувало 2%. Проведена оцінка ефективності кастомної функції втрат демонструє її переваги над стандартними методами та підтверджує практичну цінність для задач image inpainting.

Висновки

Досліджено актуальні підходи для видалення та створення текстури з метою заповнення потрібних частин. Удосконалено метод генерації контенту із застосуванням унікальної функції втрат, яка за показниками точності та часу виконання перевищує розглянуті конкурентні реалізації. Розроблено систему видалення об'єктів із цифрових зображень, що використовує алгоритм GAN на базі Python та його бібліотек для обробки комп'ютерного зору.

Результати демонструють задовільну якість видалення структур із зображень з мінімальними артефактами, навіть при низькій роздільній здатності за короткий час. Однак,

точність відновлення може знижуватися при роботі із складними чи деталізованими зображеннями. У дослідженні була розроблена методика видалення об'єктів за допомогою інтеграції сучасних типів архітектур нейронних мереж з унікальною функцією втрат.

Розроблене рішення дозволяє автоматизувати процеси редагування зображень, що зменшує витрати часу та ресурсів, необхідних для виконання таких завдань вручну. Система забезпечує доступ до інноваційних технологій для широкого кола користувачів та знижує витрати на спеціалізоване програмне забезпечення. Завдяки цьому розробка має не лише наукове, а й соціально-економічне значення, сприяючи доступності обробки візуальної інформації.

Список літератури:

1. Z. Chen, "Generative Adversarial Networks for Image Restoration: Revolutions, Challenges and Future Look," *Theor. Natural Sci.*, vol. 151, no. 1, pp. 202–210, Dec. 2025. doi: <https://doi.org/10.54254/2753-8818/2026.ch30897>.
2. C. Dong, H. Liu, X. Wang, and X. Bi, "Image inpainting method based on AU-GAN," *Multimedia Syst.*, vol. 30, no. 2, Mar. 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s00530-024-01290-3>.
3. Z. Liu and M. Qin, "Research on image inpainting methods based on machine learning," *Appl. Comput. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 67–74, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/19/20231009>.
4. A. B. Yildirim *et al.* "Inst-Inpaint: Instructing to Remove Objects with Diffusion Models." arXiv.org. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03246>.
5. H. Zheng, Z. Lin *et al.* "CM-GAN: Image Inpainting with Cascaded Modulation GAN and Object-Aware Training." arXiv.org. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11947>.
6. R. Wei *et al.* "OmniEraser: Remove Objects and Their Effects in Images with Paired Video-Frame Data." arXiv.org e-Print archive. URL: <https://arxiv.org/html/2501.07397v3>.
7. A.-A. Barglazan, R. Brad, and C. Constantinescu, "Image Inpainting Forgery Detection: A Review," *J. Imag.*, vol. 10, no. 2, p. 42, Feb. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/jimaging10020042>.
8. "What is a GAN? - Generative Adversarial Networks Explained - AWS." Amazon Web Services, Inc. URL: <https://aws.amazon.com/what-is/gan/>
9. Liu, X., Hay-Man Ng, A., Lei, F., Zhang, Y., and Li, Z., "GPNet: Simplifying Graph Neural Networks via Multi-channel Geometric Polynomials", *arXiv e-prints*, Art. no. arXiv:2209.15454, 2022. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.15454>.
10. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. URL: <http://www.deeplearningbook.org>.
11. Yuqing Ma *et al.* "Coarse-to-Fine Image Inpainting via Region-wise Convolutions and Non-Local Correlation." *Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence Main track*. Pages 3123-3129. doi: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/433>.
12. Линовський, А. О., Мухін, В. Є. "Засоби покращення якості та знешумлення зображень на основі застосування згорткових та рекурентних нейронних мереж." *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2023. № 1(78). С. 82–89. doi: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2023.018289>.
13. D. Berdnyk and D. Peleshko, "Image reconstruction using generative neural networks", *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 325, no. 5(1), pp. 30–34, Oct. 2023, URL: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/452>.
14. А. Иванов, В. Онищенко, "Методи генерації зображень з використанням мереж GAN," *Адапт. системи автомат. упр.*, vol. 1, no. 42, pp. 153–159, May 2023. doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.42.2023.279109>.
15. М. В. Семанків and О. В. Ціхун, "Вдосконалення методів імпейнтингу на основі генеративних моделей," *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля*, no. 8(294), pp. 5–10, Oct. 2025. doi: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-294-8-5-10>.

Надійшла до редколегії 20.11.2025

Відомості про авторів:

Семанків Марія Василівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: maria.semankiv@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1314-8923>

Ціхун Олександр Васильович – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: oleksandr.tsikhun@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2975-7853>

A. LEHINOVYCH, V. NEVMERZHYTSKYI, M.-I. SEMIANYK,
R. SOROKA, A. IZMAILOV, PhD (Engineering)

A GAMIFIED WEB ASSISTANT FOR SUPPORT OF LEARNING PROCESS

Introduction

Lifelong study is one of the key features of modern society. However, each age group of learners requires specific teaching methodologies to organize studying process in the most efficient way. One of the most flexible teaching methodology is gamification of the learning process [1-4, 10]. Gamification offers a wide spectrum of mechanics to introduce into the learning process in order to make it interesting for learners of different ages [5-9].

Recent researches prove the efficiency of gamification introduction into the educational process [1-4, 10]. However, most of them are focusing on the theoretical or methodological aspects of this process without introduction of the respective hardware and / or software solutions [5-9]. While being possibly more engaging, hardware gamification solutions could be too expensive in order to be affordable for an average school or university, especially in developing countries. Therefore, software solutions can be more affordable because of requiring only a computer or computer-like portable device for their usage.

Many of existing educational solutions with gamification feature onboard introduce only several mechanics being more an interactive book rather than a game [11-14]. In most cases, it results in insufficient level of learner's engagement looking like a game being a reward for learner's effort. At the same time, games with practical educational elements have proved to be effective in both engagement and learning outcome e.g. a game that incorporates tasks related to specific topics in secondary school physics course [10]. In order to beat levels and bosses in this game, pupils should use specific knowledge from the physics course. Players wish to complete the game and therefore return to a specific topic of the textbook. This is how the game fuels the learning effort while raising the engagement level.

Despite possessing high level of engagement, educational games are always at risk of turning into an entertainment without significant learning outcomes. One way of saving the balance between entertainment and education is to introduce both practice and theory in the game turning it into a useful assistant for teachers and learners.

The goal of this research is to develop a gamified web assistant to support Chemistry, English, HTML/CSS and Mathematics courses.

The scientific novelty consists of successful development of the gamified web assistant to support Chemistry, English, HTML/CSS and Mathematics courses ensuring up to 37% higher level of enjoyment of learning in comparison to regular learning while maintaining the learning outcomes at the sufficient level.

Gamified web assistant

In terms of software development, there is always a question of what platform to choose [10, 15]. Mobile devices are more flexible in terms of where and when to study and cheaper than computers. On the other hand, smaller screen size can be inconvenient when it comes to texts, formulas and visualization of graphs or spatial objects. Besides, there are multiple options concerning operation systems that remain a topical issue for both portable and stationary devices. Despite all the described advantages and disadvantages, the short answer for question "What platforms to cover?" is "All of them!"

In order to cover most of the existing platforms, two options are available:

- 1) development of the standalone build for each platform;
- 2) development of the web application.

The first option offers more stable solutions, high quality graphics, and theoretically unlimited access to system resources. On the other hand, there are high development and support costs because of hiring iOS, Android, Windows, Mac OS, Linux, etc. developers and technical specialists and respective license payments [3, 15]. Although cross-platform technologies can be used, bug-tracking support costs for each platform cannot be omitted.

The second option while offering limited access to system resources and mid-range quality of graphics is significantly more inexpensive in terms of development and support [3, 15]. However, web applications are sensitive to network issues and this disadvantage should be taken into account.

In this project, the second option is chosen because it offers cross-platform and inexpensive solutions considering that nowadays an Internet connection is widely available at home and at the educational institution. Thus, a web assistant for support of learning process is developed and tested. The proposed solution offers assistance in teaching Chemistry, English, HTML/CSS and Mathematics. The web application consists of four top-level components corresponding to each of the mentioned subjects.

Chemistry component

The Chemistry component aims at enhancing learner's skills in several topics of this subject. This component consists of a game with multiple levels matched a single plot. In the proposed game, the user takes on the role of a hero tasked with saving a princess from the castle full of locked doors, traps, puzzles and mysterious enemies.

The first level of the game offers a descriptive example of the whole component gameplay. To successfully navigate this level, the player must thoroughly study the following topics: "Acids," "Bases," and "Chemical Equations." The essence of the gameplay at this level lies in utilizing flasks containing various acids (Fig. 1). Each lock on the castle doors is composed of a specific material. The player must dissolve these locks by applying specific acids to them in order to open the doors and help the hero to get into castle. Because of material specificity, not all of the locks "interact" with a particular liquid in the flasks. Thus, the player needs to apply previously acquired knowledge to distribute resources correctly.

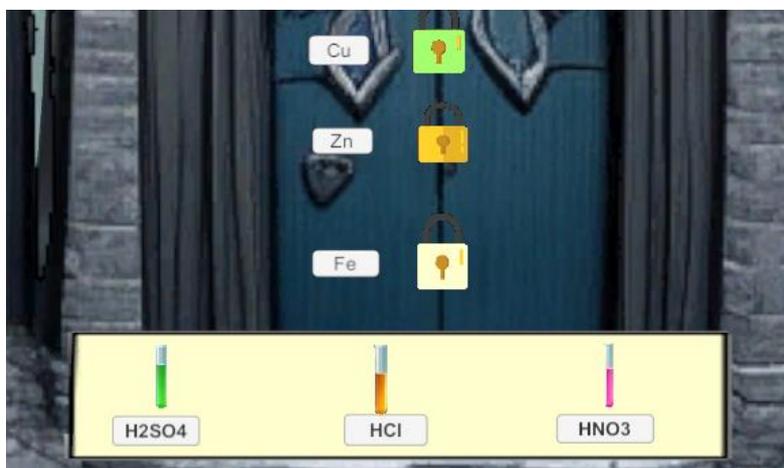
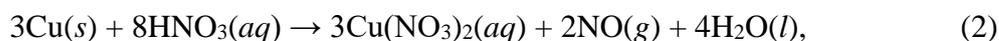
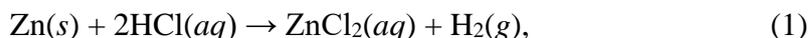


Fig. 1. The first level of the Chemistry component

The described level utilizes the following chemical equations [16]:



where (s) denotes solid physical state, (aq) denotes aqueous solution, (g) denotes gas physical state, (l) denotes liquid physical state.

In the reaction (1), zinc (Zn) reacts with hydrochloric acid (HCl). The basic idea is that an acid reacts with a metal to form a salt and release hydrogen. In this context, hydrochloric acid reacts with zinc, dissolving it and forming salt and hydrogen. In the reaction (2), copper (Cu) reacts with nitric acid (HNO₃). In this context, nitric acid reacts with copper, dissolving it and forming a salt (copper nitrate), nitrogen oxide gases and water. In the reaction (3), iron (Fe) reacts with sulfuric acid (H₂SO₄). In this context, sulfuric acid reacts with iron, dissolving it and forming salt and hydrogen [16].

In case of insufficient knowledge and application of wrong acid to the lock, the player loses the respective substance and gets the opportunity to retry only after a certain time interval. The last measure prevents the learner from brute forcing the solution and encourages them to refer to the theoretical part of the course.

English component

The English component is a platform with several tabs offering distinct activities. The first tab offers tests that are divided into 4 levels of difficulty: A1, A2, B1, and B2. The essence of the test is that a random word in English appears on the screen, and 4-6 answer options are shown proposing different translations. The user's task is to choose the correct answer (Fig. 2). Levels B1 and B2 are initially locked. In order to unlock them, the player needs to pass the first level. The test is considered to be passed successfully if the percentage of correct answers is greater than or equal to 80. The test also has a timer, which can be paused. The time provided for each test is 10 minutes. Tests are always randomly generated, e.g. two consecutive A1 tests will be different in both questions and their number. B1 and B2 tests include idioms and phrases, and the user needs to choose the correct interpretation.

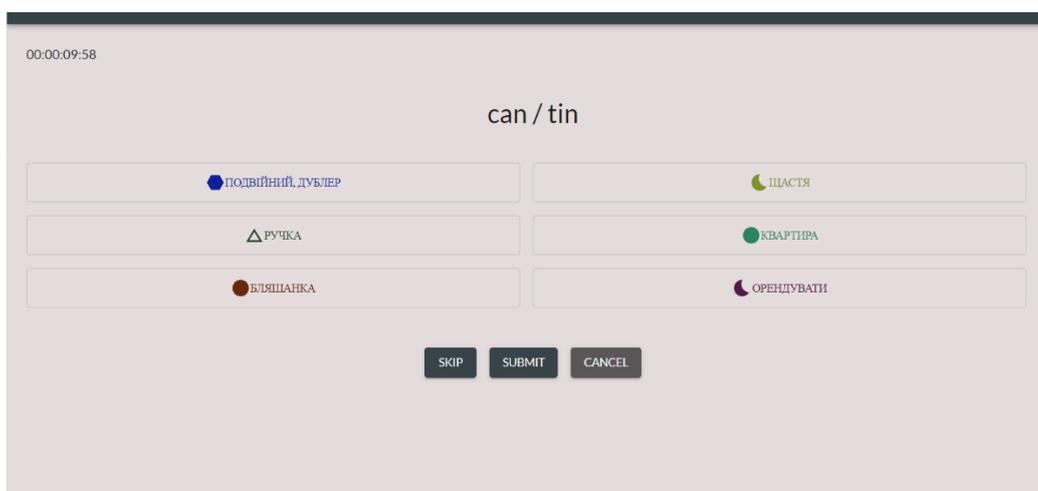


Fig. 2. Interface of an English test (6 answer options are given in Ukrainian)

The principle of closed levels is a good example of implementation for gamification because it offers a “journey to success”. Each closed level is a new stage of learner’s journey. In order to unlock the next level, users should successfully complete the current one. Thus, each level becomes a challenge but also an opportunity to discover content that is even more interesting. The principle of closed level also implements a concept of gradual development because the gamified system mimics the process of gradual development [1, 3, 4, 6]. Closed levels in this case represent degrees or stages of development that the user must pass to reach new heights.

Additionally, the platform analyzes the statistics of each attempt, and the player is able to see it in a separate tab (Fig. 3). The statistics show the completion time, answers chosen, and correct answers. With a help of statistics tab, the learner can summarize their progress and analyze mistakes in order to fill the gaps in their vocabulary.

Question - true
Answers
 правдивий ціна страва іноземць подвійний, дублер гордий

Answer
✓ правдивий

Question - pen
Answers
 ручка сестра масло літак

Answer
✓ ручка

Question - feminine
Answers
 жіночі / жіночий голос трішки спідниця

Answer
✗ жіночий / жіночний

Fig. 3. Interface of a statistics tab

The third tab offers a platformer game. The player controls the main character, who embarks on a journey through an impressive structure filled with dangers (Fig 4). The player's task is to avoid various obstacles such as spikes, moving platforms, collapses, and other hazards that may threaten the hero's life.



Fig. 4. Interface of the platformer game in English component

Along the way, the player will encounter chests located on different levels of the game. Each chest contains a word in player's native language that the player must translate. This word could be a key element for solving a puzzle on the next level or further stages of the game. For example, the player may encounter a chest with the word "light." After opening the chest, the player receives the word "light." This word turns out to be important for understanding a certain puzzle on the next level or subsequent stages of the game. The game effectively utilizes the interactivity of the platformer, combining it with puzzle elements and an educational component. This makes it interesting and challenging for players of all ages and language proficiency levels.

HTML/CSS component

The HTML/CSS component offers a collectible card game for learning HTML/CSS. This approach combines theory learning with practical exercises. The game-based card learning for HTML/CSS aims to teach the basics of working with HTML and CSS using a card-based mechanism. The player receives cards with specific concepts, properties, or tags, such as "background-color," "border," "div," etc. The information on these cards helps learners to grasp the theoretical aspects of programming languages.

One of the key aspects of this game is its gamified approach. The player is rewarded with code cards that they can use to build their own web elements. This mechanism resembles collecting collectible cards and motivates the player to continue learning.

After learning the theoretical part, the player could test their knowledge in task mode. In this mode, the player is presented with specific tasks, such as creating elements with certain properties, which they must reproduce using their own cards. For example, the player is tasked with creating a blue square with a red border (Fig. 5).



Fig. 5. Task presentation before its completion in HTML/CSS component

In order to complete the task, the player should choose the correct combination of cards corresponding to the correct combination of HTML elements and CSS rules (Fig. 6). The player can observe the results of current card combination and alter the cards chosen, grab new cards from the deck or ask the game for a hint. The more cards are in player's deck, the more complicated tasks they can accept in order to progress further.

Game-based card learning for HTML/CSS reflects modern approaches to education, combining gamification with the acquisition of programming theory [1-3, 6, 7]. This method stimulates active player participation and promotes effective learning, making the learning process more engaging.

Mathematics component

The Mathematics component consists of two major modules: learning module with tasks typical for class-based lessons and gamified module with in-game tasks utilizing the learned theoretical part of the certain topic.

The landing page of the learning module is a lobby with levels to be unlocked by completing the previous ones (Fig. 7). Each level consists of several stages containing theory and practical tasks. The level is completed if all its corresponding tasks are solved correctly.



Fig. 6. Completed task appearance in HTML/CSS component

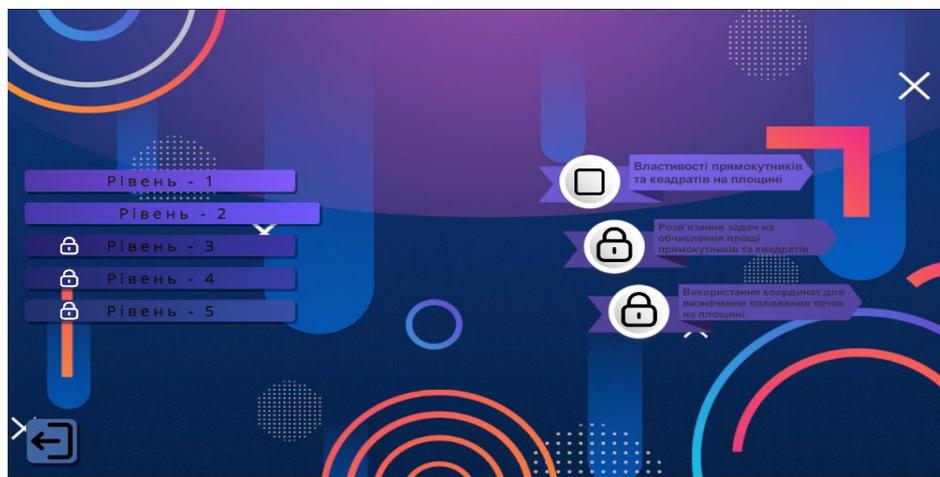


Fig. 7. Lobby with levels in the learning module of the Mathematics component

The gamified module offers a game "Forest under threat: Hero with mathematical abilities". The main character, while studying mathematics, finds out that thieves are trying to destroy the forest and decides to use their mathematical skills to save the home of forest dwellers. The gameplay consists of solving mathematical puzzles, enlisting forest dwellers for a help, and expelling the thieves. For example, player can place a trap for thieves by simplifying the given algebraic expression. In case of a battle scenario, the player is tasked to place the forest warriors in vertices of the rectangular with area equal to 20 m², etc. As all preparations are done, the battle scene starts (Fig. 8) and the player can observe the outcomes, analyze their strategy, and correct mistakes if the battle was unsuccessful.

Combination of knowledge application and elements of a strategic game produces a high level of motivation for learners to improve their math skills in both theory and practice.

Effectiveness test

The efficiency analysis was performed with the help of group of 12 undergraduate adult students of the "Information Systems and Technologies" program at Vasyl Stefanyk Carpathian National University in Ivano-Frankivsk, Ukraine, who volunteered to provide their feedback required to estimate the benefits of the proposed web assistant.



Fig. 8. Battleground in the gamified module of the Mathematics component

Half of the group was offered to study the following topics:

- “Chemical equations” in Chemistry;
- “B1 vocabulary” in English;
- “Box model: styling” in HTML/CSS;
- “Geometric figures on the plane” in Mathematics;

using the proposed web assistant. The rest of the students were offered to study the same topics in a regular way using books, learning videos, etc. After the completion of the learning course all volunteers were tested for their knowledge with the same tests resulting in the mark in range from 1 to 10 points for each of the learning courses. They were also asked to rank their experience in terms of learning engagement and enjoyment of learning in range from 1 to 10 points for each of the learning courses.

The average values of the given ranks were calculated excluding the highest and lowest values using the following expression (4) [3, 8]:

$$TrimMean = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - n_{max}x_{max} - n_{min}x_{min}}{n - n_{max} - n_{min}}, \quad (4)$$

where x_i denotes the i th rank (in points), $i=1, \dots, n$, n denotes the number of ranks, n_{max} denotes the number of the highest ranks, x_{max} denotes the value of the highest rank, n_{min} denotes the number of the lowest ranks, x_{min} denotes the value of the lowest rank.

The calculated average rank values for every course can be found in table 1 for the proposed web assistant and in table 2 for the regular learning. Table 3 contains the ratios between the data in table 1 and table 2 showing the advantage of the proposed solution over the regular learning process.

Table 1

Average estimation ranks for the proposed web assistant

Course	Learning outcomes	Learning engagement	Enjoyment of learning
Chemistry	6.76	5.92	7.04
English	7.23	7.61	6.08
HTML/CSS	8.04	8.43	8.22
Mathematics	5.64	6.50	7.37

Table 2

Average estimation ranks for the regular learning

Course	Learning outcomes	Learning engagement	Enjoyment of learning
Chemistry	6.65	7.33	5.84
English	7.04	6.04	5.32
HTML/CSS	7.73	6.63	6.48
Mathematics	7.39	6.23	5.38

Table 3

Ratios between average estimation ranks for the proposed web assistant and the regular learning

Course	Learning outcomes	Learning engagement	Enjoyment of learning
Chemistry	1.02	0.81	1.21
English	1.03	1.26	1.14
HTML/CSS	1.04	1.27	1.27
Mathematics	0.76	1.04	1.37

Obtained results can be visualized using radar diagrams (Fig. 9) in order to comprehend advantages and disadvantages of the proposed solution in comparison to the regular learning process.

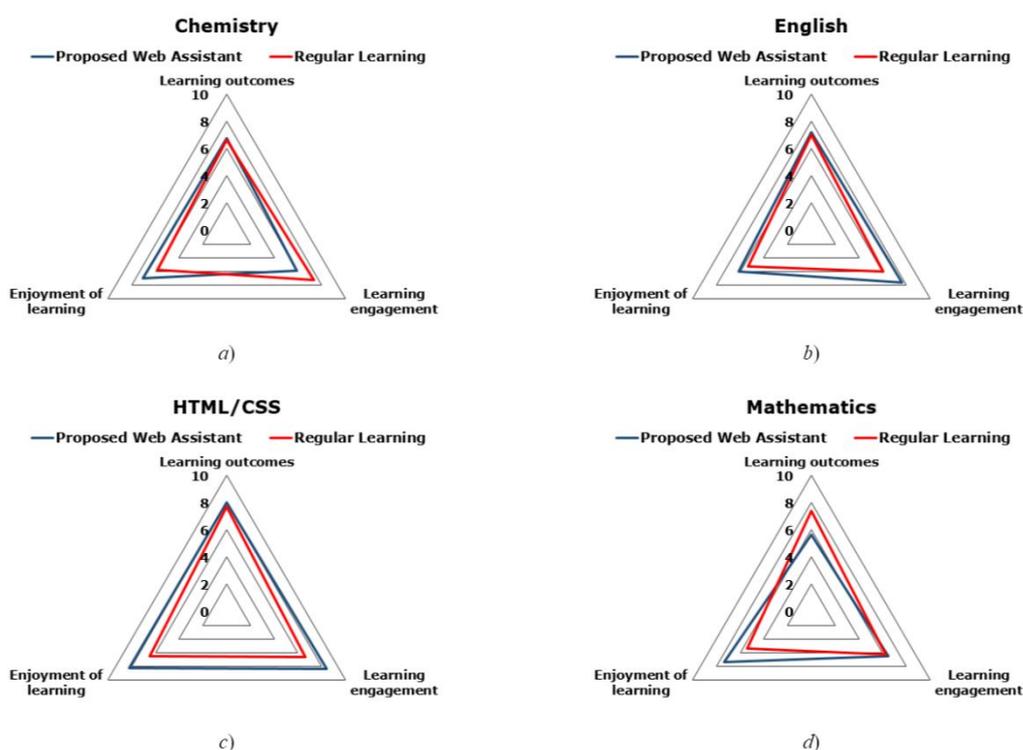


Fig. 9. Radar diagrams of the average estimation ranks for the proposed web assistant and the regular learning for the Chemistry course (a), for the English course (b), for the HTML/CSS course (c), and for the Mathematics course (d)

From the results obtained (Table 3 and Fig. 9) it follows that introduction of the proposed web assistant shows distinct level of efficiency for different courses. In case of Chemistry, learning outcomes are on the same level as for regular learning, however learning engagement is 19% lower while enjoyment of learning is 21% higher. Large number of learning videos demonstrating real chemical reactions that are always engaging probably causes lower learning engagement rank. This

result seems to be scalable for the real-world classes with chemical reactions right before the learner's eyes.

In case of English, learning outcomes are 3% higher, while engagement and enjoyment are 26% and 14% higher respectively. It seems that learning vocabulary depends not on the motivation level but on learner's abilities to learn the foreign language.

In case of HTML/CSS course, learning outcomes are 4% higher, while engagement and enjoyment are both 27% higher. The reason for the not so high performance at learning outcomes is the professional skills of the study participants. They are all proficient at programming, so it is not hard for them to learn how to code from regular sources full of code listings. At the same time, all participants highly appreciated the gamified way of learning how to code, so the proposed solution seems to be optimistic at learning outcomes improvement in case of learners not experienced in programming.

In case of Mathematics, learning outcomes are 24% lower, while engagement and enjoyment are 4% and 37% higher respectively. It seems that learners tend to lose focus while playing the game or they can just brute force solutions without understanding the task requirements to progress through the game. At the same time, gamified Mathematics course is in demand in order to make the learning process not so boring.

Conclusions

The proposed web assistant offers an engaging and enjoyable learning process for different courses but obviously has its flaws. While the Chemistry course requires engaging visualizations of the chemical reactions and Mathematics course requires balancing in order to stop learners from brute forcing it, the whole application raises the level of enjoyment of learning up to 37% in comparison to regular learning. It means that application of the proposed web assistant in learning process can reduce the stress of learners on the corresponding value while maintaining the learning outcomes at a slightly higher level.

Further studies consist of polishing the existing gamification mechanics and introducing the new ones and gathering feedback from learners and teachers at educational institutions.

References:

1. S. A. Triantafyllou, C. Georgiadis, and T. Sapounidis, "Gamification in education and training: A literature review," *Int. Rev. Educ.*, Apr. 2025. doi: <https://doi.org/10.1007/s11159-024-10111-8>.
2. T. Kovács, S. Kovács, and L. Várallyai, "Adapting to the digital age: Gamification's role in revolutionizing education for youth students," *Human Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 339–359, Oct. 2025. doi: <https://doi.org/10.14254/1795-6889.2025.21-2.5>.
3. S. E. Ojonuba, G. Türkmen, and Ş. Toker, "Enhancing Web Development Education with Game-based and Gamification Learning: A Study of Engagement, Motivation and Performance," *IEEE Access*, p. 1, 2025. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3595510>.
4. E. Simsek and T. Karakus Yilmaz, "A Systematic Review of the Effects of Gamification in Online Learning Environments on Learning Outcomes," *Open Prax.*, vol. 17, no. 1, Apr. 2025. doi: <https://doi.org/10.55982/openpraxis.17.1.692>.
5. A. Alenezi, "Teacher perspectives on ai-driven gamification: impact on student motivation, engagement, and learning outcomes," *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 97, no. 5, pp. 138–148, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.33407/itlt.v97i5.5437>.
6. N. Cavus, I. Ibrahim, M. Ogbonna Okonkwo, N. Bode Ayansina, and T. Modupeola, "The Effects of Gamification in Education: A Systematic Literature Review," *BRAIN. Broad Res. Artif. Intell. Neurosci.*, vol. 14, no. 2, pp. 211–241, Jun. 2023. doi: <https://doi.org/10.18662/brain/14.2/452>.
7. Oliveira, W., Hamari, J., Shi, L. *et al.*, "Tailored gamification in education: A literature review and future agenda." *Educ Inf Technol* 28, 373–406. 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11122-4>.
8. J. Chen and M. Liang, "Play hard, study hard? The influence of gamification on students' study engagement," *Frontiers Psychol.*, vol. 13, Oct. 2022. doi: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.994700>.
9. R. Smiderle, S. J. Rigo, L. B. Marques, J. A. Peçanha de Miranda Coelho, and P. A. Jaques, "The impact of gamification on students' learning, engagement and behavior based on their personality traits," *Smart Learn. Environ.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2020. doi: <https://doi.org/10.1186/s40561-019-0098-x>.
10. Kushnir S.Yu. and Izmailov A.V., "A Gamified Support System for Studying the Physics Course in Secondary School," *Computer Science, Information Technologies and Management Systems: Proceedings of the Young Scientist*

International Conference of Science and Technology (CSYSC-2022) (in Ukrainian), Ivano-Frankivsk, PNU, 2022, pp. 165-168.

11.R. Software. "Periodic Table - Free download and install on Windows | Microsoft Store." Microsoft Store - Download apps, games & more for your Windows PC. [Online]. URL: <https://apps.microsoft.com/detail/9wzdncrfjblf>.

12. "Games." British Council. [Online]. URL: <https://learnenglishkids.britishcouncil.org/fun-games/games>.

13. "Learn Code By Playing Games." Coding Fantasy. [Online]. URL: <https://codingfantasy.com/>.

14. "PhET Interactive Simulations." PhET. [Online]. URL: <https://phet.colorado.edu/en/>.

15.M. A. H. Fahad, R. Chowdhury, and H.-A. Shabbir, "Evolution and Future Trends in Web Development: A Comprehensive Review," *Pathfinder Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 31–43, May 2022. doi: <https://doi.org/10.69937/pf.por.3.1.35>.

16. "Chemical equation." Britannica. [Online]. URL: <https://www.britannica.com/science/chemical-equation>.

Submitted to the editorial board 23.11.2024

Information about the authors:

Andrii Lehinovich – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: lehinovych.andrii@comp-sc.if.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8556-7533>

Volodymyr Nevmerzhytskyi – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: nevmerzhytskyi.volodymyr@comp-sc.if.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2692-3426>

Myroslav-Ivan Semianyk – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: semianyk.myroslav-ivan@comp-sc.if.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4851-9663>

Rostyslav Soroka – магістрант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: soroka.rostyslav@comp-sc.if.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7829-2370>

Artem Izmailov – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: artem.izmailov@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6165-7490>

М.Ф. ПАВЛЮК, канд. фіз.-мат., наук, В. В. МАРТИНЮК

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА
СЕРЦЕВО-СУДИННОЮ АКТИВНІСТЮ**

Вступ

Серцево-судинні захворювання (ССЗ) належать до провідних причин смертності у світі та є одними з найпоширеніших патологій людського організму [1–4]. Своєчасна діагностика та профілактика ССЗ набувають особливої актуальності, а сучасні технології дозволяють реалізовувати інноваційні методи моніторингу та аналізу фізіологічних показників у реальному часі. Перехід від реактивного підходу до профілактичної, персоналізованої та прогностичної медицини передбачає постійне спостереження за серцевою активністю, що підвищує ефективність виявлення відхилень і запобігає критичним станам. Розробка портативних систем моніторингу серцевої діяльності дозволяє проводити безперервну діагностику у будь-яких умовах, відкриваючи нові можливості для клінічного застосування та індивідуального контролю здоров'я.

Методика розробки портативної системи моніторингу серцевої діяльності

Портативна комп'ютеризована система моніторингу серцевої діяльності людини спроектована для роботи у декількох режимах, що забезпечують комплексний контроль за станом серцевих ритмів. Кожен режим виконує специфічні функції збору, обробки та передачі даних, що дозволяє отримувати точну та наочну інформацію про стан серця [5, 6]. Блок-схема роботи продемонстровано на рис. 1.

Режим збору даних забезпечує неперервне отримання сигналів із сенсорів протягом заданого інтервалу часу. ЕКГ-сигнал надходить до мікроконтролера, де виконується попередня цифрова обробка: фільтрація перешкод (смуговий фільтр 0,5 - 40 Гц, notch-фільтр 50 Гц), нормалізація та формування часових рядів із мітками часу. Після цього дані структуруються у форматі JSON і готуються до передачі на віддалений сервер для зберігання та аналізу.

Передача даних реалізується за моделлю «пристрій – сервер – лікар». Пристрій через Wi-Fi надсилає дані до серверної частини медичної інформаційної системи, де вони зберігаються та стають доступними сімейному лікарю через захищений веб-інтерфейс. Концептуально така модель подібна до eHealth, однак у запропонованій реалізації передбачено персоналізований доступ конкретного лікаря на основі електронної згоди пацієнта.

Ключовим аспектом є криптографічний захист. Серед протоколів, що застосовуються для захисту передавання даних, виділяють SSL (застарілий і небезпечний), TLS 1.0–1.2 (із підтримкою симетричного шифрування AES), TLS 1.3 (сучасний стандарт із примусовим використанням стійких алгоритмів), IPSec (захист на мережевому рівні), а також HTTPS як реалізацію HTTP поверх TLS. Для IoT-рішень поширеним є MQTT із TLS або DTLS для UDP-з'єднань.

У межах TLS 1.3 застосовується гібридна криптографічна схема:

– асиметричне шифрування (RSA або алгоритм обміну ключами ECDHE на основі еліптичних кривих) використовується під час handshake для безпечного формування спільного сеансового ключа;

- симетричне шифрування (AES-256-GCM або ChaCha20-Poly1305) забезпечує швидке шифрування основного потоку даних;
- хеш-функції (SHA-256/384) гарантують цілісність повідомлень;
- механізм Perfect Forward Secrecy унеможливує розшифрування раніше перехопленого трафіку навіть у разі компрометації приватного ключа.

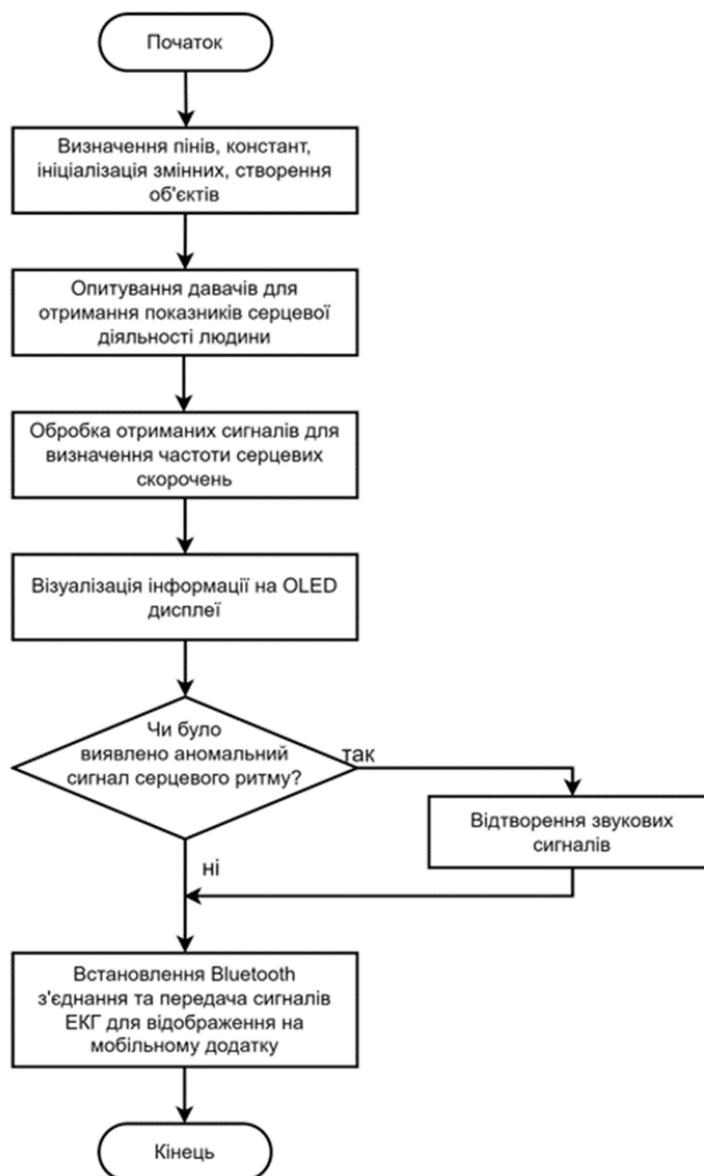


Рис. 1. Блок-схема алгоритму роботи системи

Процес дешифрування відбувається на сервері шляхом використання відповідного сеансового ключа, сформованого під час криптографічного обміну. Таким чином забезпечуються конфіденційність, автентичність і цілісність медичних даних. З огляду на криптостійкість і мінімізований час встановлення з'єднання, оптимальним вибором для системи є HTTPS або MQTT поверх TLS 1.3.

Для передачі телеметрії може використовуватися брокер повідомлень Eclipse Mosquitto із шифруванням TLS 1.3. Зберігання даних доцільно реалізувати у хмарному середовищі з безкоштовним тарифом, наприклад Firebase (Spark Plan). У цьому випадку ЕКГ-дані передаються через HTTPS-запити до Realtime Database або Cloud Firestore, а доступ лікаря

забезпечується через автентифікацію (OAuth 2.0) та рольову модель доступу. Роботу алгоритму передачі даних продемонстровано рис. 2.

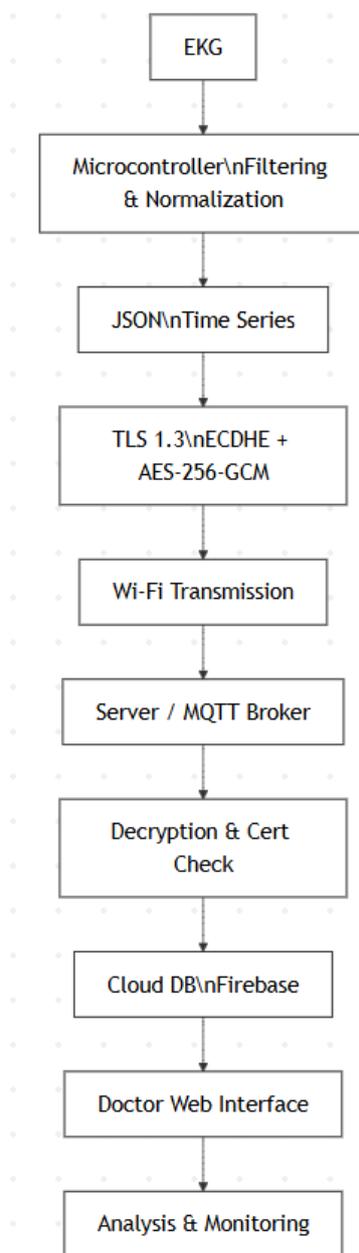


Рис. 2. Архітектура системи збору та захищеної передачі ЕКГ-даних

Сенсор AD8232 є спеціалізованим підсилювачем для зняття біопотенціалів серця. Він працює за принципом реєстрації електричних імпульсів, що виникають при збудженні серцевого м'яза.

Основна формула для вихідного сигналу:

$$V_{out}(t) = G * V_{ECG}(t) \quad (1)$$

де, $V_{out}(t)$ – вихідна напруга сигналу (мВ), $V_{ECG}(t)$ – реальний біоелектричний потенціал серця (мВ), G – коефіцієнт підсилення (для AD8232 типовий коефіцієнт становить від 100 до 1000).

Режим відображення даних забезпечує візуалізацію сигналів на OLED-дисплеї високої роздільної здатності. Система відображає цифрові та графічні показники, що дозволяє користувачу оцінювати стан серцевої діяльності безпосередньо на пристрої. Висока якість візуалізації робить інформацію доступною для швидкого та ефективного контролю [8].

Режим передачі даних реалізований через бездротові інтерфейси Bluetooth та Wi-Fi. Це дозволяє надсилати оброблені дані на зовнішні пристрої, такі як смартфони або персональні комп'ютери, забезпечуючи віддалений моніторинг та можливість подальшого збереження і аналізу даних у базі для довготривалого спостереження.

Режим сповіщення призначений для сигналізації про критичні зміни у параметрах серцевої діяльності. Звуковий генератор миттєво інформує про потенційно небезпечні стани, що сприяє своєчасній реакції та запобігає серйозним ускладненням.

Робота системи реалізована за допомогою багатоступеневого алгоритму (рис.3).

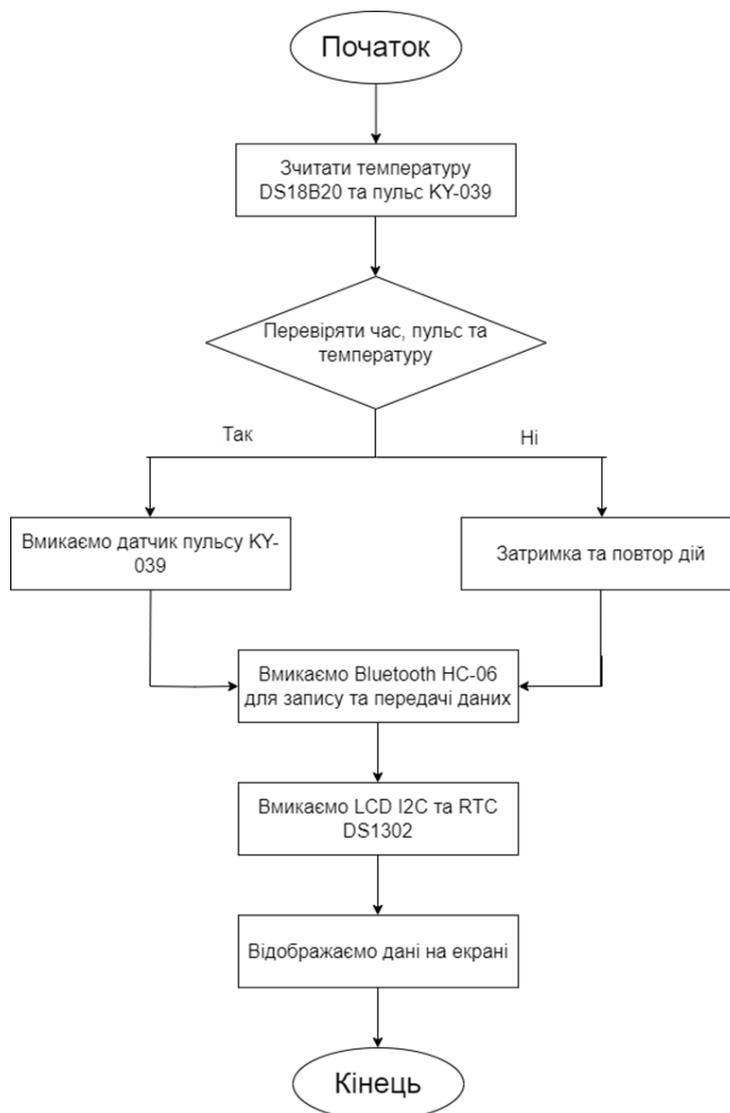


Рис. 3. Алгоритм роботи системи

Підготовка та налаштування середовища розробки

Для розробки програмної частини системи було створено стабільне та відтестоване середовище, яке включає сучасні інструменти програмування, бібліотеки та середовища виконання. Основною мовою обрано Python, що забезпечує високу гнучкість у роботі з даними, інтеграцію з веб-технологіями та реалізацію алгоритмів машинного навчання [9, 10]. Python дозволяє швидко розробляти як серверну логіку, так і аналітичні модулі, одночасно забезпечуючи доступ до великої кількості готових бібліотек для обробки сигналів, статистичного аналізу та візуалізації.

Інтерфейс користувача реалізовано за допомогою HTML, CSS та JavaScript, що забезпечує сучасний веб-дизайн та інтерактивну візуалізацію даних. За допомогою Flask створено серверну частину веб-застосунку, яка обробляє запити, маршрутизує дані та керує комунікацією між фронтендом і базою даних. Локальне зберігання інформації про користувачів та пацієнтів здійснюється у форматі JSON, що дозволяє швидко серіалізувати дані та забезпечує їхню просту інтеграцію з хмарними сервісами.

Для аналітичної обробки медичних сигналів використано бібліотеки машинного навчання, зокрема scikit-learn та PyTorch. Вони дозволяють класифікувати сигнали ЕКГ, виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відхилення серцевої діяльності. Реалізація алгоритмів включає нормалізацію вхідних сигналів, побудову часових рядів, обчислення статистичних та спектральних характеристик та навчання моделей на реальних даних. Завдяки Python програмне забезпечення може динамічно підключати нові алгоритми аналізу без необхідності кардинальних змін архітектури.

Середовище розробки Visual Studio Code забезпечує інтеграцію з Git для контролю версій, автодоповнення коду, налагодження, роботу з віртуальними середовищами та ізоляцію залежностей. Це дозволяє підтримувати структуровану та ефективну розробку програмного забезпечення, де кожний модуль тестується окремо, а зміни не впливають на стабільність системи.

Програмна реалізація для ESP32 є ключовим елементом системи, оскільки він виконує роль центрального обчислювального модуля. Код для ESP32 створюється у середовищі Arduino IDE і побудований за принципом модульного програмування. Кожен модуль відповідає за окрему функцію: обробку сигналів ЕКГ та пульсометра, передачу даних через Wi-Fi або Bluetooth, шифрування та інтеграцію з серверною частиною системи. Такий підхід дозволяє гнучко масштабувати систему, підключати нові сенсори та алгоритми аналізу без необхідності повної переробки програмного забезпечення.

У результаті програмна архітектура забезпечує надійну роботу системи у реальному часі, інтегрує аналітичні та веб-компоненти, а також дозволяє легко підключати лікаря до моніторингу стану пацієнта через захищені канали зв'язку.

Особливості реалізації

Асинхронна обробка: багатопоточність дозволяє одночасно збирати, обробляти та передавати дані.

Безпечна передача: шифрування комунікацій та автентифікація підключення забезпечують захист персональних даних.

Логування та контроль стану сенсорів: своєчасне виявлення збоїв і відновлення роботи системи.

Інтерактивна веб-система та мобільний додаток.

Веб-застосунок реалізовано за архітектурою MVC. Серверна частина на Flask приймає дані від ESP32, зберігає їх у базі та обробляє для відображення. Фронтенд на HTML/CSS/JS відображає графіки та показники у браузері користувача, забезпечуючи інтерактивний аналіз.

Мобільний додаток Bluetooth Graphics дозволяє підключитися до ESP32 через Bluetooth, отримувати дані у реальному часі та візуалізувати їх на смартфоні (рис.4). Це забезпечує повний цикл моніторингу: збір, обробку, передачу та візуалізацію інформації про серцеву діяльність.

Тестування та фізична реалізація

Прототип системи виконано у компактному корпусі з модулем ESP32, OLED-дисплеєм, сенсорами та акумуляторним живленням. Конструкція забезпечує портативність, автономність і точність вимірювань (рис. 4).



Рис. 4. Фізичний вигляд пристрою

Сенсор AD8232 відповідає за збір біопотенціалів серця здійснює вимірювання параметрів серцевих ритмів за допомогою фотоплетизмографії. Модуль microSD дозволяє зберігати дані для подальшого аналізу. Результат вимірювання показано на рис. 5.

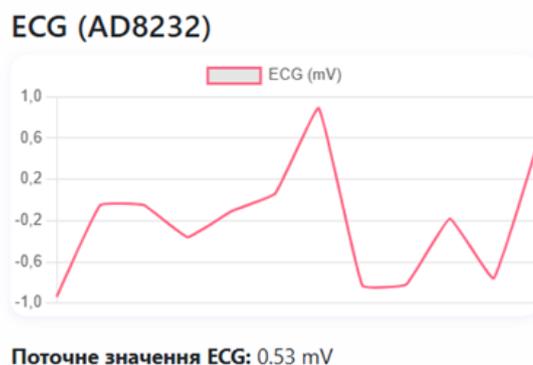


Рис. 5. Покази датчиків

Система забезпечує відображення графічних та цифрових параметрів на дисплеї, звукову сигналізацію, бездротову передачу даних та інтеграцію з веб- і мобільними застосунками, створюючи повноцінне рішення для моніторингу серцевої діяльності людини.

Висновки

У ході дослідження проаналізовано та розроблено портативний апаратно-програмний комплекс для моніторингу серцевої діяльності на основі мікроконтролера ESP32. Проаналізовано сучасні технології контролю серцевих показників і обґрунтовано доцільність використання бездротових рішень для дистанційного спостереження. Реалізовано алгоритми обробки сигналів, що забезпечують зменшення впливу шумів і підвищення достовірності результатів. Експериментальні випробування підтвердили працездатність і потенційну придатність розробленої системи для застосування в персональній телемедицині та біомедичних дослідженнях.

Список літератури:

1. B. S. Dzundza, I. T. Kohut, V. I. Holota, L. V. Turovska, and M. V. Deichakivskiy, "Principles of Construction of Hybrid Microsystems for Biomedical Applications," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 23, no. 4, pp. 776–784, Dec. 2022. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-784>.
2. I. T. Kogut, B. S. Dzundza, V. I. Holota, O. I. Bulbuk, V. V. Fedoriuk, and L. I. Nykyruy, "Modeling of integrated signal converters for biomedical sensor microsystems," *Phys. Chemistry Solid State*, vol. 24, no. 3, pp. 515–519, Sep. 2023. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.515-519>.
3. I. Kogut *et al.*, "Cyber-physical System for Monitoring and Analyzing Human Biomedical Data," *Advances Cyber-Physical Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 32–38, May 2024. doi: <https://doi.org/10.23939/acps2024.01.032>.
4. I. Chaikovsky, A. Popov, D. Fogel, and A. Kazmirchuk, "Development of AI-based method to detect the subtle ECG deviations from the population ECG norm," *Eur. J. Preventive Cardiol.*, vol. 28, Supplement_1, May 2021. doi: <https://doi.org/10.1093/eurjpc/zwab061.229>.
5. I. A. Chaikovsky, M. A. Primin, and A. P. Kazmirchuk, "Development and implementation in medical practice of new information technologies and metrics for the analysis of subtle changes in the electromagnetic field of the human heart," *Visnik Nac.' Acad.' Nauk Ukraini*, no. 02, pp. 33–43, Feb. 2021. doi: <https://doi.org/10.15407/visn2021.02.033>.
6. M. Bocharov *et al.*, "Assessment of the activities physiological cost of the defense forces officers in Ukraine using miniature ECG device," *Front. Cardiovasc. Med.*, vol. 10, Oct. 2023. doi: <https://doi.org/10.3389/fcvm.2023.1239128>.
7. I. A. Chaikovsky *et al.*, "Mild myocardial injury during percutaneous coronary intervention based on minor changes on electrocardiogram and heart rate variability," *World J. Cardiol.*, vol. 17, no. 12, Dec. 2025. doi: <https://doi.org/10.4330/wjc.v17.i12.112141>.
8. I. Chaikovsky *et al.*, "Subtle changes on electrocardiogram in severe patients with COVID-19 may be predictors of treatment outcome," *Frontiers Artif. Intell.*, vol. 8, Mar. 2025. doi: <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1561079>.
9. D. O. Dziuba, O. O. Syvoraksha, I. A. Tchaikovsky, O. V. Khavryuchenko, V. V. Solovyov, and O. A. Loskutov, "Long-term electrocardiographic monitoring in a cardiac surgery hospital: modern views and experience of application of telemonitoring system after coronary stenting," *EMERG. MED.*, vol. 17, no. 1, pp. 38–43, Apr. 2021. doi: <https://doi.org/10.22141/2224-0586.17.1.2021.225718>
10. G. Georgieva-Tsaneva, E. Gospodinova, and K. Cheshmedzhiev, "Examination of Cardiac Activity with ECG Monitoring Using Heart Rate Variability Methods," *Diagnostics*, vol. 14, no. 9, p. 926, Apr. 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/diagnostics14090926>.

Надійшла до редколегії 17.11.2025

Відомості про авторів:

Павлюк Мирослав Федорович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: myroslav.pavliuk@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-2918>

Мартинюк Віталій Васильович – магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника / Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: vitalii.martyniuk@cnu.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4310-6302>

ABSTRACTS

РЕФЕРАТИ

ELECTRONICS, ELECTRONIC COMMUNICATIONS, INSTRUMENTATION AND RADIO ENGINEERING

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

UDC 004.4:6

Digital Medical Stethoscope with Bioacoustic Signal Processing and Analysis Algorithms / I.T. Kohut, N.V. Shkvarok, T.I. Komaryshyn // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 7-11.

The paper briefly presents the results of experimental research on the development of a digital medical mobile phonendoscope for the rapid diagnosis of human cardiopulmonary pathologies. The proposed system approach to the design of hardware and software parts based on Arduino Nano together with Blue Tooth HC-06 will provide the possibility of high functionality, scalability and practical value of a digital phonendoscope. Diagnostics of a person's condition using digital phonendoscopy methods will increase the objectivity of auscultation and minimize the influence of the human factor. Such a phonendoscope can be integrated with cloud services with the capabilities of remote analysis and telemedical consultation and remote data transmission to specialists.

Key words: acoustic diagnostics, auscultation, bioacoustic signals, digital stethoscope, digital signal processing, medical device software, phonocardiography.

6 fig. Ref: 10 items.

УДК 004.4:6

Цифровий медичний фонендоскоп з алгоритмами обробки та аналізу біоакустичних сигналів / I.T. Kohut, N.V. Shkvarok, T.I. Komaryshyn // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 7-11.

У роботі коротко наведено результати експериментальних досліджень з розробки цифрового медичного мобільного фонендоскопа для оперативної діагностики серцево-легеневих патологій людини. Запропонований системний підхід до проектування апаратної та програмної частин на базі Arduino Nano разом з Blue Tooth HC-06 дозволить забезпечити можливості високої функціональності, масштабованості та практичної цінності цифрового фонендоскопа. Діагностика стану людини методами цифрової фонендоскопії підвищить об'єктивність аускультатії та мінімізує вплив людського фактору. Такий фонендоскоп може інтегруватися з хмарними сервісами з можливостями дистанційного аналізу та телемедичного консультування й дистанційної передачі даних спеціалістам.

Ключові слова: акустична діагностика, аускультатія, біоакустичні сигнали, цифровий фонендоскоп, цифрова обробка сигналів, програмне забезпечення медичних пристроїв, фонокардіографія.

Л. 6. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 621.316:629.113

Methods of control of power electronic converters of fast charging stations for electric vehicles with energy storage devices / V.M. Pivnenko // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 12-16.

The article analyzes methods of control for power electronic converters in EV fast charging stations with energy storage. A hybrid approach combining model predictive control and fuzzy logic with EIS diagnostics is proposed to adapt to load variations and renewable energy integration. Mathematical models for AC-DC and DC-DC stages are presented, including equations for power transfer, state of charge, and impedance spectroscopy. Simulations in MATLAB/Simulink and experimental validation demonstrate a 4.5% efficiency increase, 18% reduction in current ripples, and early degradation detection compared to traditional PI control. The method minimizes grid impact, suitable for networks with limited capacity. Scientific novelty lies in integrating online EIS for real-time battery diagnostics within the control framework. Results are validated through statistical and experimental analysis, highlighting prospects for AI integration.

Key words: power converters; EV charging; energy storage; control methods; hybrid algorithm; model predictive control; fuzzy logic; EIS diagnostics.

1 tabl. Ref: 15 items.

УДК 621.316:629.113

Методи керування силовими електронними перетворювачами станцій швидкого заряджання електромобілів з накопичувачами енергії / V.M. Pivnenko // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 12-16.

Стаття аналізує методи керування силовими електронними перетворювачами станцій швидкого заряджання електромобілів з накопичувачами енергії. Запропоновано гібридний підхід, що поєднує модельне

передбачувальне керування та нечітку логіку з діагностикою EIS для адаптації до варіацій навантаження та інтеграції відновлюваних джерел. Наведено математичні моделі для AC-DC та DC-DC етапів, включаючи рівняння передачі потужності, стану заряду та імпедансної спектроскопії. Симуляції в MATLAB/Simulink та експериментальна валідація показують підвищення ефективності на 4,5%, зменшення пульсацій струму на 18% та раннє виявлення деградації порівняно з традиційним PI-керуванням. Метод мінімізує вплив на мережу, придатний для мереж з обмеженою потужністю. Наукова новизна полягає в інтеграції онлайн EIS для діагностики батареї в реальному часі в рамках керування. Результати валідовано статистичним та експериментальним аналізом, підкреслюючи перспективи інтеграції ШІ.

Ключові слова: силові перетворювачі; заряджання EV; накопичувачі енергії; методи керування; гібридний алгоритм; модельне передбачувальне керування; нечітка логіка; діагностика EIS.

Табл. 1. Бібліогр.: 15 назв.

SOFTWARE ENGINEERING

ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

UDC 004.942+004.415:530.145

Hybrid classical-quantum algorithm and its implementation on a real quantum computer / V.M. Tkachuk // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 17-24.

In this work a Hybrid Quantum Genetic Algorithm (HQGA) for functional optimization problems is presented. All basic operators are implemented using a quantum computer, while auxiliary computations, such as the fitness function and the search for the best individual in the population, are performed on a classical computer. Quantum state tomography is used to organize the evolutionary process – recovering the probability amplitudes of a qubit state based on the measurement results of its quantum ensemble.

HQGA modeling is conducted using the IBM Qiskit environment with the ideal AerSimulator and models of real quantum computers (FakeMarrakesh, FakeBrisbane, FakeKyoto, etc.). Results demonstrate that it provides fast convergence with small population sizes, outperforming classical genetic algorithms in speed and accuracy, and requires a small number of iterations. The evaluation of the impact of simulation parameters (noise models of real quantum computers) confirmed the method's robustness in overcoming hardware limitations of modern IBM quantum devices and quantum errors.

Key words: quantum genetic algorithm, hybrid algorithm, functional optimization, Qiskit, AerSimulator, quantum tomography, superposition, entanglement.

4 tab. 3 fig. Ref.: 11 items.

УДК 004.942+004.415:530.145

Гібридний класично-квантовий алгоритм та його реалізація на реальному квантовому комп'ютері / V.M. Tkachuk // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 17-24.

У роботі запропоновано гібридний квантовий генетичний алгоритм (Hybrid Quantum Genetic Algorithm, HQGA) для задач функціональної оптимізації. Всі базові оператори реалізовано засобами квантового комп'ютера, а допоміжні обчислення, як то функція пристосованості та пошук найкращої особини популяції виконуються на класичному комп'ютері. Для організації еволюційного процесу використовується томографія квантових станів – відновлення амплітуд імовірності стану кубіта за результатами вимірювання його квантового ансамблю.

Проведено моделювання HQGA за допомогою середовища IBM Qiskit з використанням ідеального симулятора AerSimulator та моделей реальних квантових комп'ютерів (FakeMarrakesh, FakeBrisbane, FakeKyoto тощо). Показано, що він забезпечує швидку збіжність при невеликих розмірах популяції, перевершуючи класичні генетичні алгоритми за швидкістю та точністю при невеликій кількості ітерацій. Аналіз впливу параметрів симуляції (шумові моделі реальних квантових комп'ютерів) підтвердили стійкість методу до апаратних обмежень сучасних квантових пристроїв IBM та квантових помилок.

Ключові слова: квантовий генетичний алгоритм, гібридний алгоритм, функціональна оптимізація, Qiskit, AerSimulator, квантова томографія, суперпозиція, заплутаність.

Табл. 4. Іл. 3. Бібліогр.: 11 назв.

UDC 004.05+004.89

Research on the dependence of software quality for intrusion detection on feature selection methods in machine learning models / I.Ya. Savka, M.S. Dutchak, O.T. Koval // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 25-32.

The rapid increase in the complexity of cyberattacks and the growing volume of network traffic impose higher requirements on intrusion detection systems (IDS) in terms of detection accuracy, performance, and scalability. Machine learning methods play a key role in the development of modern IDS, and their effectiveness largely depends on the quality of feature selection. However, most existing studies focus on improving individual classification metrics, while the comprehensive evaluation of IDS software quality index, including resource costs associated with feature

selection such as training time, inference speed, and scalability, remains insufficiently addressed.

This paper analyzes the role of machine learning and feature selection methods in intrusion detection tasks and considers the requirements of the ISO/IEC 25010 standard for software quality. Based on this, a system of quality indicators for intrusion detection systems is developed, and an integrated quality index is proposed that combines both functional and non-functional characteristics of the model.

A software tool was developed to automate the full cycle of experiments comparing different feature selection methods and machine learning models based on open network traffic datasets, with subsequent calculation of the integral quality indicator and visualization of the results.

The results demonstrate that the choice of feature selection method and the reduction of the feature space have a significant impact on the performance and scalability of intrusion detection systems, emphasizing the importance of considering this factor in a comprehensive evaluation of the modern IDS quality index.

Key words: intrusion detection systems, feature selection, machine learning, ISO/IEC, quality indicator, performance, scalability, reliability, functional suitability, software metrics, integrated quality index.

3 tab. 6 fig. Ref.: 10 items.

УДК 004.05+004.89

Дослідження залежності якості ПЗ для виявлення вторгнень від методів вибору ознак у моделях машинного навчання // І.Я. Савка, М.С. Дутчак, О.Т. Коваль // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 25-32.

Стрімке ускладнення кібератак та зростання обсягів мережевого трафіку зумовлюють підвищення вимог до систем виявлення вторгнень (IDS) щодо точності виявлення, продуктивності та здатності до масштабування. Суттєвий внесок у розвиток таких систем забезпечують методи машинного навчання, ефективність яких значною мірою визначається якістю відбору інформативних ознак. Водночас переважна більшість наявних досліджень зосереджена на покращенні окремих класифікаційних показників, приділяючи недостатню увагу комплексній оцінці якості програмного забезпечення системи, що враховують ресурсні витрати, пов'язані із застосуванням відбору ознак, час навчання моделей, швидкість прогнозування та їх масштабованість при роботі з великими обсягами даних.

У роботі проаналізовано роль методів машинного навчання і відбору ознак у задачах виявлення вторгнень, а також вимоги стандарту ISO/IEC 25010 щодо якості програмного забезпечення. На цій основі була розроблена система показників якості для систем виявлення вторгнень та запропоновано інтегральний показник якості, який поєднує функціональні та нефункціональні характеристики моделі.

Розроблено програмний засіб, що автоматизує повний цикл експериментів із порівняння різних методів відбору ознак і моделей машинного навчання на основі відкритих наборів даних мережевого трафіку, із подальшим обчисленням інтегрального показника якості та візуалізацією результатів.

Результати демонструють, що вибір методу FS та зменшення простору ознак суттєво впливають на продуктивність і масштабованість IDS, підкреслюючи необхідність врахування цього фактору при комплексній оцінці якості сучасних систем виявлення вторгнень.

Ключові слова: системи виявлення вторгнень, відбір ознак, машинне навчання, ISO/IEC, показник якості, продуктивність, масштабованість, надійність, функціональна придатність, метрики програмного забезпечення, інтегральний показник якості.

Табл. 3. Лл. 6. Бібліогр.: 10 назв.

COMPUTER SCIENCE КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

UDC 004.9:006.354

Generative Adversarial Networks for Image Restoration and Inpainting / M.V. Semankiv, O.V. Tsikhun // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 33-37.

The aim of this work is to investigate methods of Generative Adversarial Networks (GANs) for image inpainting tasks and to develop a software implementation of a system for restoring graphic content using enhanced generation algorithms. The research is based on experimental modeling of a neural network and the development of a specialized loss function. The study proposes an improved image generation method with a unique loss function, which reduces generator loss compared to the basic GAN architecture and enhances the quality of graphic content restoration. A prototype of the image inpainting system was developed, demonstrating effective object removal and restoration of image textures and color features. The system provides high processing speed and stability of results, which has been confirmed experimentally. The developed system has practical significance for all areas where visual data processing is critical, including computer vision and information technology. The implementation of the proposed approach improves the quality of object removal in images and expands the capabilities of generative models in tasks of restoration and editing of graphic content.

Key words: generative adversarial network, image inpainting, graphic content, python.

1 fig. Ref: 15 items.

УДК 004.9:006.354

Генеративні конкурентні мережі для відновлення графічного контенту та зафарбовування зображень / М.В. Семаньків, О.В. Ціхун // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 33-37.

Метою роботи є дослідження методів генеративних конкурентних мереж (GAN) для задач зафарбовування зображень (image inpainting) та розробка програмної реалізації системи для відновлення графічного контенту з використанням удосконалених алгоритмів генерації. В роботі запропоновано вдосконалений метод генерації зображень із унікальною функцією втрат, що дозволяє зменшити втрати генератора порівняно з базовою GAN-архітектурою та підвищує якість відновлення графічного контенту. Розроблено прототип системи image inpainting, який демонструє ефективність видалення об'єктів та відновлення текстурних і кольорових особливостей зображень. Система забезпечує високу швидкість обробки та стабільність результатів, що підтверджено експериментально. Розроблена система має практичне значення для всіх сфер, де обробка візуальних даних є критичною, включаючи комп'ютерний зір та інформаційні технології. Впровадження запропонованого підходу сприяє підвищенню якості видалення об'єктів зображень та розширює можливості генеративних моделей у задачах реставрації та редагування графічного контенту.

Ключові слова: генеративна конкурентна множина, image inpainting, графічний контент, python.

Лл. 1. Бібліогр.: 15 назв.

UDC 004.42:004.738.5:004.946

A Gamified Web Assistant for Support of Learning Process / A. Lehinovych, V. Nevmerzhytskyi, M.-I. Semianyk, R. Soroka, A. Izmailov // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 38-47.

This paper describes the architecture, implementation, and evaluation of a gamified web assistant designed to support learning in Chemistry, English, HTML/CSS, and Mathematics courses. The system is implemented as a modular web-based application following a component-oriented architecture, where each course is encapsulated as an independent functional module integrating instructional content delivery and game-driven interaction mechanisms. The platform is developed using modern web technologies to ensure scalability, responsiveness, and cross-platform compatibility.

The educational subsystem provides structured theoretical materials, interactive exercises, and automated assessment tools, while the gamification subsystem incorporates multiple game mechanics, including puzzle-solving scenarios, platformer-style progression, collectible card mechanics, and strategic decision-making models. These mechanics are embedded into the learning workflow through a rule-based progression system, reward algorithms, scoring models, and adaptive feedback loops. Particular attention is given to user interface design, state management, and synchronization between learning tasks and gameplay elements to maintain consistency of the learning process and system stability.

Experimental evaluation includes usability analysis and comparative experimental assessment involving student participants. Quantitative and qualitative data were collected to measure engagement, motivation, and learning outcomes. The experimental results indicate that the integration of structured educational content with interactive game mechanics improves user engagement and perceived learning satisfaction while preserving academic performance at a statistically acceptable level. The study demonstrates that a technically structured gamified web system can effectively combine software engineering principles with instructional design requirements.

Key words: game development, game mechanics, gamification, interactive learning systems, learning process, web application development.

3 tabl. 9 fig. Ref: 16 items.

УДК 004.42:004.738.5:004.946

Гейміфікований веб-асистент для підтримки процесу навчання / А. Легінович, В. Невмержицький, М.-І. Сем'яник, Р. Сорока, А. Ізмайлов // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №3, С. 38-47.

У статті описано архітектуру, реалізацію та оцінювання гейміфікованого веб-асистента, призначеного для підтримки навчання з курсів хімії, англійської мови, HTML/CSS та математики. Система реалізована як модульний веб-застосунок, побудований за компонентно-орієнтованою архітектурою, у межах якої кожен курс інкапсульовано як незалежний функціональний модуль, що інтегрує подання навчального контенту та механізми ігрової взаємодії. Платформу розроблено з використанням сучасних веб-технологій для забезпечення масштабованості, адаптивності та кросплатформної сумісності.

Освітня підсистема надає структуровані теоретичні матеріали, інтерактивні вправи та засоби автоматизованого оцінювання, тоді як підсистема гейміфікації реалізує різноманітні ігрові механіки, зокрема сценарії розв'язування головоломок, прогресування у стилі платформера, механіки колекційної карткової гри та моделі стратегічного ухвалення рішень. Зазначені механіки інтегруються у навчальний процес за допомогою системи прогресу на основі правил, алгоритмів винагороди, моделей нарахування балів і адаптивних циклів зворотного зв'язку. Особливу увагу приділено проектуванню інтерфейсу користувача, керуванню станами системи та синхронізації між навчальними завданнями й ігровими елементами з метою забезпечення цілісності навчального процесу та стабільності роботи системи.

Експериментальне оцінювання включало аналіз зручності використання та порівняльне експериментальне дослідження за участю здобувачів освіти. Для вимірювання рівня залученості, мотивації та навчальних результатів було зібрано кількісні та якісні дані. Отримані результати свідчать, що інтеграція структурованого навчального контенту з інтерактивними ігровими механіками підвищує залученість користувачів і задоволеність навчанням, зберігаючи академічні результати на статистично прийнятному рівні. Дослідження демонструє, що технічно структурована гейміфікована веб-система здатна ефективно поєднувати принципи програмної інженерії з вимогами дидактичного проектування.

Ключові слова: гейміфікація, ігрові механіки, інтерактивні навчальні системи, процес навчання, розробка веб-застосунків, розробка ігрового програмного забезпечення.

Табл. 3. Іл. 9. Бібліогр.: 16 назв.

COMPUTER ENGINEERING КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

UDC 004.6:004.9:004.031.43

Modern methods of electronic monitoring of cardiovascular activity / *M.F. Pavlyuk, V.V. Martynyuk* // Information Technologies and Engineering Electronics : Scientific journal, 2025, №3, P. 48-54.

The study demonstrates that implementing a system for monitoring cardiovascular diseases using portable devices and microcontrollers enables effective personalized tracking of patients' physiological data in real time. The proposed architecture includes digital signal processing of ECG and other biosignals, data analysis with anomaly detection through machine learning algorithms, and secure transmission of data (TLS 1.3, encryption) to servers and cloud databases with controlled access for healthcare providers. The system is built on IoT technologies, API integration, and web services, ensuring remote monitoring, scalability, cybersecurity, and convenient access to results for medical personnel, thereby improving the efficiency and timeliness of clinical decision-making.

Key words: cardiovascular diseases, portable monitoring, physiological data, personalized monitoring, databases, data protection, ECG, remote monitoring, IoT.

5 fig. Ref: 10 items.

УДК 004.6:004.9:004.031.43

Сучасні методи електронного спостереження за серцево-судинною активністю / *М.Ф. Павлюк, В.В. Мартинюк* // Інформаційні технології та інженерна електроніка : Науковий журнал, 2025, №2, С. 48-54.

У роботі показано, що впровадження системи для моніторингу серцево-судинних захворювань на базі портативних пристроїв та мікроконтролерів забезпечує ефективне персоналізоване спостереження за фізіологічними даними пацієнтів у реальному часі. Запропонована архітектура включає цифрову обробку сигналів ЕКГ та інших біосигналів, аналіз даних із виявленням аномалій за допомогою алгоритмів машинного навчання, а також передачу даних через захищені канали (TLS 1.3, шифрування) на сервери та хмарні бази даних із контрольованим доступом лікаря. Реалізація системи базується на технологіях IoT, API-інтеграції та веб-сервісах, що забезпечує дистанційний моніторинг, масштабованість, кібербезпеку та зручний доступ до результатів для медичного персоналу, підвищуючи ефективність та оперативність прийняття рішень у медичній практиці.

Ключові слова: серцево-судинні захворювання, портативний моніторинг, фізіологічні дані, персоналізоване спостереження, бази даних, захист даних, ЕКГ, дистанційний моніторинг, IoT.

Іл. 5. Бібліогр.: 10 назв.

**SCIENTIFIC JOURNAL
INFORMATION TECHNOLOGIES AND
ENGINEERING ELECTRONICS**

ISSN 3083-7618

eISSN 3083-7626

Issue 3

In English and Ukrainian

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА
ІНЖЕНЕРНА ЕЛЕКТРОНІКА**

ISSN 3083-7618

eISSN 3083-7626

Випуск 3

Англійською та українською мовами

Комп'ютерна верстка І.В. Свид

Підп. до друку 26.12.2025. Формат 60x90/8. Папір офсет. Гарнітура Таймс. Друк. ризограф.
Ум. друк. арк. 7,0. Тираж 100 прим. Ціна договір.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника (КНУВС)
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57 тел. +38 (0342) 75-23-51, факс +38 (0342) 53-15-74,
e-mail: office@pnu.edu.ua, office@cnu.edu.ua.

Друк: підприємець Голіней О.М.
вул. Галицька, 128, м. Івано-Франківськ, 76008
Тел. +38(0342) 58-04-32